Djelotvornost oklapanja za frekvencije u opsegu 20 MHz - 10 GHz

Brijačak, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:856517

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

DJELOTVORNOST OKLAPANJA ZA FREKVENCIJE U OPSEGU 20 MHz – 10 GHz

Diplomski rad

Vedran Brijačak

Osijek, 2016.

SADRŽAJ:

1. UVOD....1

2. TEORIJA OKLAPANJA ELEKTROMAGNETSKIH VALOVA....2
   2.1. Fizikalni utjecaji kod širenja elektromagnetskog vala....2
   2.2. Elektromagnetsko polje....4
   2.3. Faradayev kavez....6
   2.4. Teorija oklapanja ravnim valom....7
   2.5. Računanje djelotvornosti oklapanja za određeni materijal....11

3. IZRADA KUĆIŠTA....13
   3.1. Izrada prvog kućišta....13
   3.2. Izrada drugog kućišta....16

4. MJERENJE DJELOTVORNOSTI OKLAPANJA....18
   4.1. Oprema korištena za mjerenje....18
   4.2. Mjerenje djelotvornosti oklapanja prvog kućišta....22
   4.3. Mjerenje djelotvornosti oklapanja drugog kućišta....27

5. ZAKLJUČAK....31
6. LITERATURA....32
7. SAŽETAK....33
8. ŽIVOTOPIS....34
9. PRILOZI....35

1. UVOD

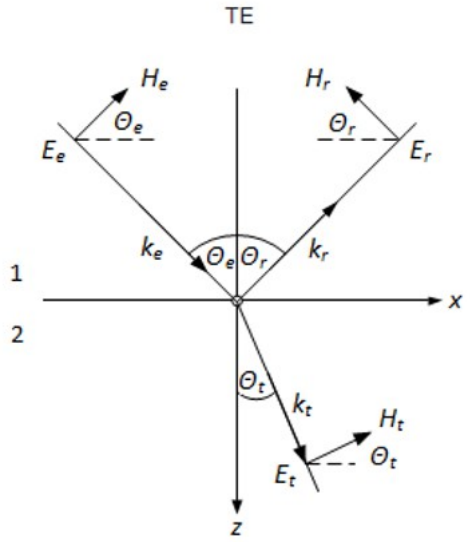
U diplomskom radu će biti prikazano mjerenje učinkovitosti oklapanja od elektromagnetskog polja na visokim frekvencijama u opsegu od 20 [Mhz] do 10 [Ghz], to su radio i mikrovalne frekvencije koje se koriste u radio i mobilnim komunikacijama. Oklapanje dolazi od engleske riječi "Shielding" što znači štit ili oklop. Oklop načinjen od vodljivog materijala predstavlja Faradayev kavez koji se koristi za zaštitu od elektromagnetskog zračenja. U današnje vrijeme je drastično pojačan promet komunikacija na razini radijskih i mikro valova, a oklapanjem se amplitude zračenja prigušuju, u slučaju da je prijemna antena u cijelosti oklopnjena zračenje za dovoljno visoke frekvencije ovisno o vrsti i debljini vodljivog materijala od kojeg je načinjeno kućište ne bi trebalo proći oklop, tako da unutar oklopa nema elektromagnetskog zračenja na visokim frekvencijama ako je prijemna antena u potpunosti oklopnjena. Oklopi koji će se koristiti za mjerenje djelotvornosti oklapanja imaju otvor što će rezultirati smanjenjem amplitude zračenja unutar oklopa, tako da će postojati elektromagnetsko zračenje unutar oklopa ali će to zračenje biti manje amplitude nego da se prijemna antena nalazi u slobodnom prostoru. Za mjerenje su korištena dva oklopa načinjena od bakra različitih debljina i dimenzija kućišta te otvora na prednjoj plohi. Usporedbom rezultata oba kućišta je prikazano kako dimenzije kućišta i otvora te debljina materijala s kojim je oklopnjeno prijemno mjesto antene utječu na gušenje elektromagnetskog polja. Na rezultate mjerenja utječu fizikalni utjecaji elektromagnetskog vala, u slučaju mjerenja u neizoliranoj prostoriji očekujemo refleksije od poda, stropa okolnih zidova, i svih ostalih predmeta koji se nalaze u prostoru. Uz direktnu zraku koja kroz otvor na kućištu pada na prijemnu antenu koja je namještena tako da se nalazi u ravnini odašiljačke antene padaju i zrake reflektirane u prostoru. Da bi se smanjile refleksije prostora, mjerenja se često obavljaju na otvorenom gdje u širem opsegu nema objekata, u takvom slučaju uzima se u obzir zraka reflektirana od tla. Mjerenja u daljnjem radu su obavljena u zatvorenom prostoru, tako da se treba uzeti u obzir ne savršenost zbog refleksija u prostoru. U radu je prikazan teorijski dio elektromagnetskog polja, fikizalni opis elektromagnetskog vala, i teorijski opis Faradayevog kaveza. U drugom dijelu je opisana izrada samih kućišta koja će se koristiti za mjerenje, prikazani su i 3D modeli kućišta. U posljednjem dijelu rada djelotvornost oklapanja izmjerena je spektralnim analizatorom unutar oklopljene točke mjerenja, kao ulaz spektralnog analizatora koristi se štapna monopol antena koja se nalazi unutar oklopa, a kao odašiljačka antena korišten je konusni dipol spojen na signalni generator, koji generira opseg frekvencija zadanih u radu. Mjerenje se obavlja u dva slučaja za oba kućišta, kada je prijemna antena na određenoj udaljenosti od odašiljačke antene oklopnjena u kućištu i kada je u slobodnom prostoru, djelotvornost oklapanja se računa usboredbom rezultata mjerenja na mjestu prijemne antene kada je antena oklopnjena i kada se nalazi u slobodnom prostoru.

2. TEORIJA OKLAPANJA ELEKTROMAGNETSKIH VALOVA

2.1 Fizikalni utjecaji kod širenja elektromagnetskog vala

Refleksija

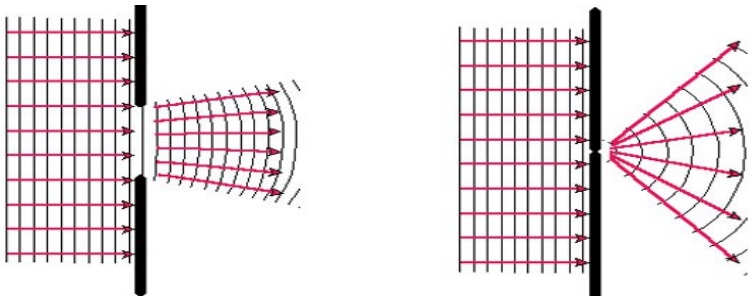
Ako se elektromagnetski val širi iz jednog sredstva u drugo, tj. dolazi na granicu dva medija koji su različiti po elektrodinamičkim svojstvima jedan dio vala se reflektira na toj granici, a drugi dio elektromagnetskog vala prolazi u drugo sredstvo na granici. Kut pod kojim se val reflektira na granici dva medija je jednak upadnom kutu vala koji dolazi na granicu dva medija. Upadni i reflektirani val se nalaze u istoj ravnini s pravcem povučenim okomito na granicu između dva medija. Upadni kut je jednak reflektiranom kutu, dok kut transmisije vala kroz drugi medij je određen svojstvom medija u koji elektromagnetski val upada.[4]



Sl. 2.1. *Refleksija elektromagnetskog vala na granici dvaju medija.*

Difrakcija

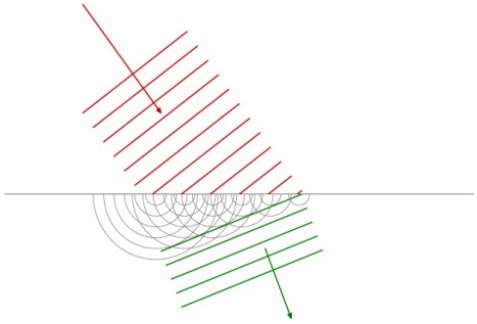
Kada elektromagnetski val nailazi na prepreku dolazi do difrakcije ili ogiba, tako da je prijem moguć iza prepreke, tj. ovisi o veličini prepreke. Val se nakon difrakcije prigušuje ovisno o valnoj duljini vala koji nailazi na prepreku određene veličine, tako da će gušenje biti veće za veće prepreke.[7]



Sl. 2.2. *Ogib elektromagnetskog vala s obzirom na veličinu pukotine.*

Refrakcija

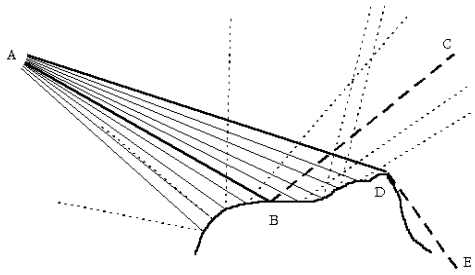
Pojava kada elektromagnetski val u slučaju nailaska iz jednog medija u drugi zbog promjene elektrodinamičkih svojstava između dva medija mijenja smjer širenja elektromagnetskog vala.[5]



Sl. 2.3. *Zakretanje vala pri prelasku iz jednog medija u drugi.*

Disperzija

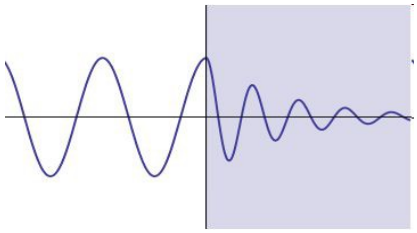
Pojava raspršenja elektromagnetskog vala događa se zbog istovremene pojava refleksije, difrakcije i refrakcije.[4] Do raspršenja elektromagnetskog vala obično dolazi na hrapavim površinama i objektima ili predmetima ne pravilnog oblika.



Sl. 2.4. *Raspršenje elektromagnetskog vala.*

Apsorpcija

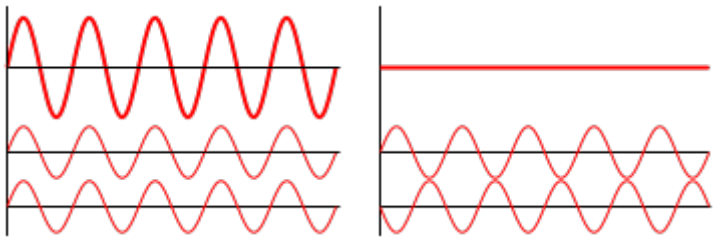
Pojava kada elektromagnetski val dolazi iz jednog medija u drugi, ovisno o vrsti materijala dio energije će se reflektirati a dio će se apsorbirati unutar materijala. Apsorpcija je gubitak energije elektromagnetskog vala zbog pretvaranja u drugi oblik pri prolasku kroz tvari, a apsorbirana energija vala se pretvara u toplinu. Dobar apsorbcijski materijal ovisno o frekvenciji vala ima minimalnu refleksiju vala, a velika većina vala je apsorbirana prolaskom kroz apsorbcijski materijal. Apsorbcija najviše ovisi o vrsti materijala, i valnoj duljini frekvencija koje dolaze na granicu s tim materijalnom.[8]



Sl. 2.5. *Gušenje vala uslijed apsorbcije.*

Interferencija

Pojava nastaje kada se dva, ili više valova jednakih frekvencija i polarizacija šire istovremeno kroz određeni medij. Elektromagnetski valovi u slučaju sudaranja ili titranja u istom mediju superponiraju što dovodi do pozitivne ili negativne interferencije, tj. pozitivna pojačava amplitudu, a negativna interferencija smanjuje amplitudu elektromagnetskog vala, odnosno dolazi do gušenja. Ako su razlike u fazama dva ili više valova blizu cijelom broju valnih duljina dolazi do pojačanja, a ako su razlike u fazama blizu neparnom broju polovina valnih duljina dolazi do gušenja osnovnog elektromagnetskog vala. Pojava promjene jakosti polja na mjestu prijema može nastati usljed višestaznog prostiranja radio vala, kada osim direktne zrake na mjesto prijema dolaze i zrake reflektirane od tla, okolnih objekata, zidova ako se radi u prostoru.[6] Takva interferencija je obično negativna, tj. dolazi do gušenja, jer reflektirane zrake fazno kasne naspram direkte zrake, na mjesto prijema.



Sl. 2.6. *Superponiranje dva vala jednakih amplituda. Valovi jednake faze (lijevo), i valovi suprotnih faza (desno).*

2.2. Elektromagnetsko polje

Elektromagnetsko polje je fizikalo opisano polje koje proizvode električki nabijeni objekti. Takvi električki nabijeni objekti stvaraju uže polje oko sebe. Takvo polje se može prikazati kao kombinacija elekričnog polja i magnetskog polja. Električno polje je proizvedeno mjestimičnim nabijanjem određenom frekvencijom, a magnetsko polje nastaje kretanjem naboja. Elekričnim i magnetskim poljem se opisuje izvor polja. Način kako naboji i kretanje naboja čine elektromagnetsko polje je opisano maxwellovim jednadžbama i Lorentzovim zakonom.

Maxwellove jednadžbe su skup diferancijalnih jednadžbi koje zajedno sa Lorentzovim zakonom čine temelje elektrodinamike. Opisuju kako se električno i magnetsko polje stvara i mijenja ovisno o nabojima i kretanju naboja.[3]

Gaussov zakon kaže da električno polje nastaje od električnog naboja. Električni tok kroz određenu zatvorenu plohu je jednak ukupnom električnom naboju unutar te zatvorene plohe.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \qquad \Big| \quad \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho \, dv \tag{2-1}$$

Gaussov zakon za magnetizam, pošto je magnetko polje opisano kretanjem naboja ono nema izvora, gdje je magnetski tok jednak nuli kroz bilo koju zatvorenu plohu.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \qquad \Big| \quad \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

(2-2)

Faradajev zakon indukcije kaže da svaka promjena magnetskog polja stvara električno polje. U integralnom obliku je integral vektora električnog polja po zatvorenoj krivulji jednak negativnoj promjeni po vremenu magnetskog toka obuhvaćenog krivuljom.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \qquad \Big| \quad \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}$$

(2-3)

Amperov zakon govori da se oko vodiča kroz kojeg teče struja inducira magnetsko polje. Svako promjenjivo električno polje inducira magnetsko polje. Za integralni oblik, integral vektora jakosti magnetskog polja po zatvorenoj krivulji jednak je zbroju struje i vremenske promjene električnog toka koji je obuhvaćen krivuljom.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \Big| \quad \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \left(\mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}$$

(2-4)

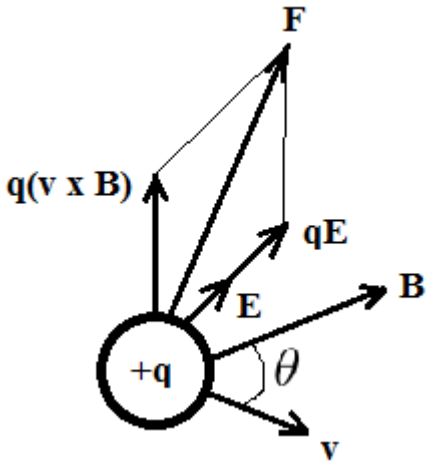
Lorentzova sila je kombinacija električne i magnetske sile na točku naboja uslijed dijelovanja elektomagnetskog polja. Ako se čestica naboja q kreće brzinom v u prisustvu električnog polja E i magnetskog polja B, stvorit će se sila koja djeluje na tu česticu. [3]

Lorentzova sila izražena prema jednadžbi (2-5):

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

(2-5)

Na slici 2.7. je prikazano kako magnetsko polje utječe na električni naboj.

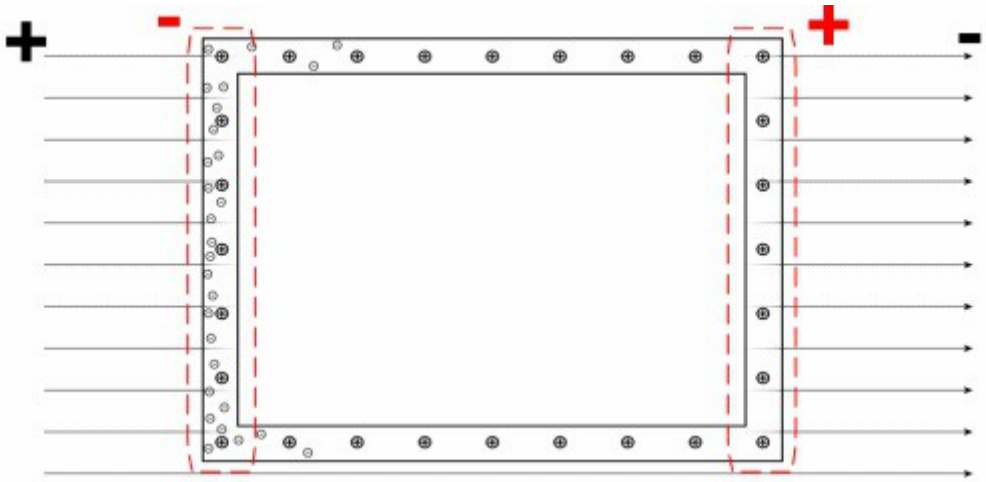


Sl. 2.7. *Lorenzova sila na naboj*

2.3. Faradayev kavez

U suštini Faradayev kavez je kućište koje se koristi u svrhu blokiranja električnog polja. Načinjen je od provodljivog materijala. Faradayev kavez radi tako da eksterno električno polje uzrokuje električne naboje uzduž provodljivog materijala kaveza tako da se elektroni uznemire i raspodjele na način da poništavaju električno polje unutar kaveza. Najviše se koriste kao zaštitna oprema za uređaje od raznih frekvencijskih interferencija. Također se koriste i za zaštitu ljudi od snažnih elektromagnetskih polja, ili zaštita od udara groma usljed atmosferskih stvaranja električnog naboja. Faradayev kavez ne može blokirati sporo promjenjivo magnetsko polje zemlje, kompas će unutar kaveza raditi. Faradayev kavez ima mrežasti oblik pa određena polja može propustiti. Faradayev kavez se može protumačiti kao aproksimacija idealnog šupljeg vodiča. Eksterno ili interno dovedeno elektromagnetsko polje proizvodi silu na nositelje naboja ili elektrone unutar vodiča. U skladu s tim elektroni se grupiraju tako da poniše dodano električno polje, poništavajući polje nosioci se polako stabiliziraju.[9]

Ako su naboji postavljeni unutar ne uzemljenog faradayevog kaveza cijela unutrašnjost je nabijena nabojem, da bi se spriječilo postojanje polja unutar kaveza. Tako je i sa djelovanjem naboja izvana, cijela kupola kaveza postaje nabijena kako bi se spriječilo postojanje polja unutar kaveza, tako se kavez ponaša ako mu dovedemo električni naboj poput munje ili groma, ne odnosi se isto na elektromagnetske valove. Ako je Faradayev kavez uzemljen naboji će biti uzemljleni umjesto da je nabijena kupola kaveza.



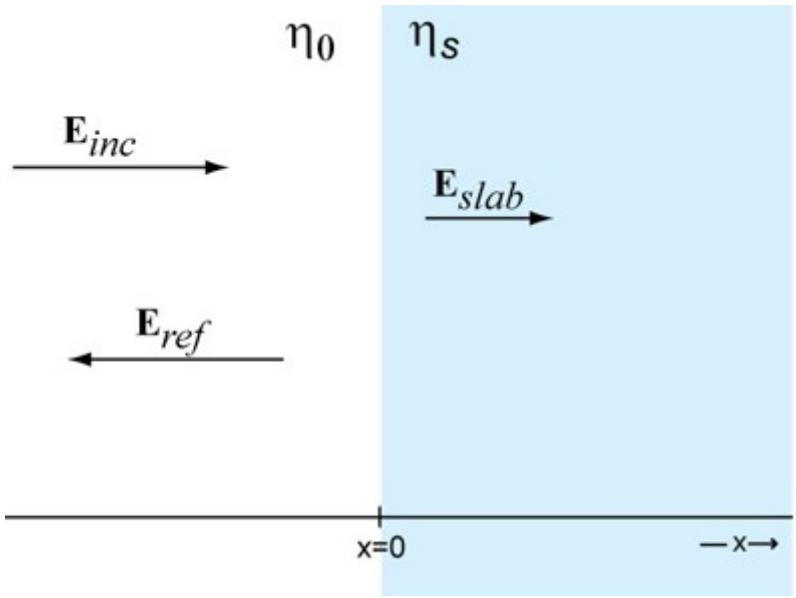
Sl. 2.8. *Princip rada Faradayevog kaveza.*

Usljed djelovanja eksternog električnog polja (Sl. 2.8.) prikazanog strijelicama, nosioci naboja u provodljivom materijalu se miču u lijevo prema pozitivno nabijenom dijelu kaveza dajući toj strani negativno nabijeni naboj , dok na desnoj strani ostaju nebalansirani naboji jezgre što sad daje desnom strani pozitivno nabijen naboj, takvo kretanje naboja stvara suprostavljeno električno polje koje poništava eksterno električno polje unutar kaveza. Polje se nautralizira tako što se stvori

polje unutar kaveza koje je suprotno do eksternog naboja, polje unutar kaveza ide od pozitivnog na negativni dio prema slici 2.8 označeno crveno. Dok se eksterno polje kreće od pozitivnog prema negativnom dijelu prikazano crnim plusom i minusom. Efektivnost oklapanja statičnog električnog polja ovisi o geometriji provodljivog materijala, usljed djelovanja magnetskog polja što su brže varijacije, bolja je otpornost materijala na penetraciju eksternog električnog polja.[9]

2.4. Teorija oklapanja ravnim valom

Kada elektromagnetski val propagira iz jednog materijala u drugi materijal sa drugačijim elektrodinamičkim svojstvima, dio energije vala se reflektira a dio je prenosi u novi material. Ako uzmemo elektromagnetski ravni val, $\mathbf{E}_{inc}$, koji dolazi u dodir sa drugim materijalom koji je u ovom slučaju beskonačna ploča kako je prikazano slikom 2.9. Val će propagirati u slobodnom prostoru u pozitivnom smjeru **x** osi sve dok ne udari u materijal koji ima drugačiju intrističnu impedanciju, $\boldsymbol{\eta}_s$, od slobodnog prostora čija je intristična impedancija označena sa $\boldsymbol{\eta}_0$. [2]



Sl. 2.9. *Ravni val udara u materijal oklapanja.*

Magnetsko polje u ravnom valu je okomito na električno polje i njegovu amplitudu.

$$|\mathbf{H}_{inc}| = \frac{|\mathbf{E}_{inc}|}{\eta_0} \tag{2-6}$$

Intristična impedancija slobodnog prostora (približno 377 ohm).

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \tag{2-7}$$

Kada ravni val dođe do beskonačne ploče stvaraju se dva vala od kojih je jedan reflektirani $\mathbf{E}_{ref}$, i drugi je val koji je prenesen u ploču, $\mathbf{E}_{slab}$. Magnetsko polje unutar materijala oklapanja je povezano sa električnim poljem.

$$|\mathbf{H}_{slab}| = \frac{|\mathbf{E}_{slab}|}{\eta_s}.$$

(2-8)

Graniči uvijeti na površini ploče označeno sa x=0, zahtjevaju jednakost električnog i magnetskog polja oko označene točke (x=0).

$$\mathbf{E}_{x=0^-} = \mathbf{E}_{x=0^+} \quad \mathbf{H}_{x=0^-} = \mathbf{H}_{x=0^+}$$

(2-9)

U kojima indexi **x**=0- i **x**=0+ označavaju polje lijevo ili desno od x=0 površine. U slučaju da zadovoljimo jednadžbu (2-6) preko jednadžbe (2-9), amplituda reflektiranog polja mora zadovoljiti relaciju prema jednadžbi (2-10).

$$|\mathbf{E}_{ref}| = |\mathbf{E}_{inc}|\,\Gamma_E$$

(2-10)

Koeficijent reflektiranog elektičnog polja, $\mathbf{\Gamma}_E$.

$$\Gamma_E = \frac{\eta_s - \eta_0}{\eta_s + \eta_0}.$$

(2-11)

Ampituda prenesenog polja, $\mathbf{E}_{slab}$ se definira prema jednadžbi (2-12).

$$|\mathbf{E}_{slab}| = |\mathbf{E}_{inc}|\,T_{E_1}$$

(2-12)

Koeficijent prenesenog električnog polja, $\mathbf{T}_{E1}$.

$$T_{E_1} = \frac{2\eta_s}{\eta_s + \eta_0}$$

(2-13)

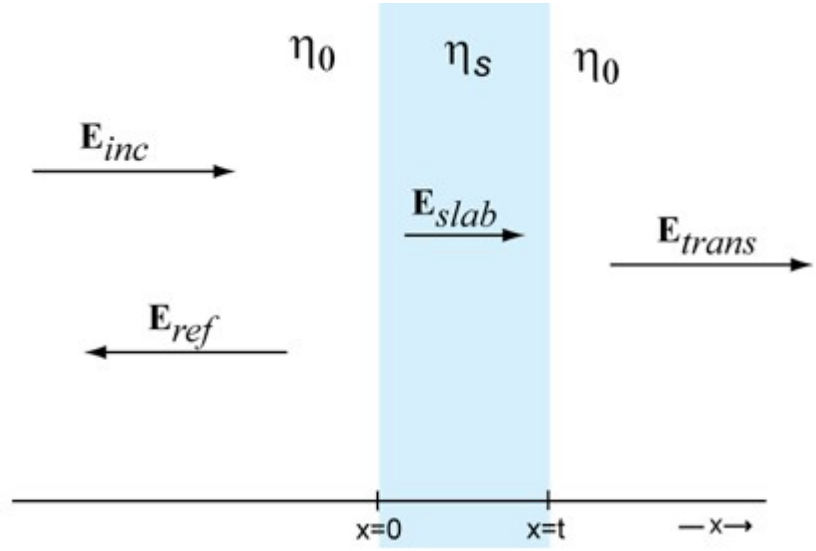
Što je vrijednost intristične impedancije materijala, $\boldsymbol{\eta}_s$, u koji ulazi ravni val bliži vrijednosti intristične impedancije matrijala, $\boldsymbol{\eta}_0$, iz kojeg dolazi, koeficijent prijenosa se povećava a koeficijent refleksije se smanjuje. U slučaju da su intistične impedancije oba materijala jednake, ($\boldsymbol{\eta}_s = \boldsymbol{\eta}_0$), cijelo polje je preneseno. Ako materijal beskonačne ploče uključuje disipaciju ili gubljenje elektromagnetske energije, (σ je različito od nule), prenesenom valu će se smanjivati amplituda dok propagira kroz materijal. [1]

$$|E_{slab}(x)| = |E_{slab}(x=0)| * e^{\frac{-x}{\delta}}$$

(2-14)

Skin depth materijala, δ , za materijale sa visokim gubitkom se izražava prema jednadžbi (2-15).

$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{\pi * f * \mu * \sigma}} \tag{2-15}$$



Sl. 2.10. *Ravni val na ploči konačne debljine oklopnog materijala.*

Uzmimo u obzir konačnu debljinu materijala oklapanja prikazanog na slici 2.10. Ravni val koji dolazi prema točki x=0 udara u površinu materijala oklapanja $\mathbf{E}_{inc}$. Dio snage, $\mathbf{E}_{ref}$, polja je reflektirano dok dio snage, $\mathbf{E}_{slab}$, nastavlja propagirati kroz materijal. Taj dio koji je nastavio propagirali kroz materijal se guši prije nego što udari u slijedeću granicu x=t, u toj točki opet se dio snage reflektira nazad u materijal gdje se guši kako propagira, a dio snage, $\mathbf{E}_{trans}$, je prenesen u novi materijal. Ako je gušenje veliko snaga reflektirana u točki x=t se apsorbira kroz materijal, a polje koje je preneseno desno od toče x=t u slobodan prostor prikazuje se prema jednadžbi (2-16). [1]

$$\left|\mathbf{E}_{trans}\right| = \left|\mathbf{E}_{slab}(x=t)\right| T_{E_2} \tag{2-16}$$

$$T_{E_2} = \frac{2\eta_0}{\eta_0 + \eta_s}. \tag{2-17}$$

Ako uzmemo u obzir amplitude prenesenog polja, $\mathbf{E}_{slab}$, i koeficijenta prenesenog električnog polja $\mathbf{T}_{E1}$, skin depth materijala i kombiniramo ih sa jednadžbama za prenesenu energiju (2-16) i (2-17) $\mathbf{T}_{E2}$ dobivamo izraz za preneseno električno polje prema jednadžbi (2-18).

$$|E_{trans}| = |E_{inc}| * \frac{2\eta_s}{\eta_0 + \eta_S} * \left(\frac{2 * \eta_0}{\eta_0 + \eta_S}\right) * e^{\frac{-t}{\delta}} \tag{2-18}$$

Prema jednadžbi (2-18), izraz se podrazumjeva za bilo koji materijal oklapanja koji je puno deblji od skin depth-a. Tipično za najbolji oklop ravnog vala bili bi vodiči sa velikom provodljivosti, $\sigma >> \omega\varepsilon$, za dobre vodiče se koristi izraz prema jednadžbi (2-19).[2]

$$\eta = \sqrt{\frac{j * \omega * \mu}{\sigma + j * \omega * \varepsilon}} \approx \sqrt{\frac{j * w * \mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega * \mu}{\sigma}} * e^{\frac{j*\pi}{4}}$$

(2-19)

Za ovakve materijale gdje je intristična impedancija materijala puno manja od intristične impedancije slobodnog prostora, $\eta_s << \eta_0$, jednadža (2-18) se smanjuje na ovaj izraz jednadžbe (2-20).

$$|E_{trans}| = |E_{inc}| * \frac{4 * \eta_S}{\eta_0} * e^{\frac{-t}{\delta}}$$

(2-20)

Definiramo učinkovitost oklapanja, S.E. (eng. "Shielding efficiency"), dane ploče pomoću jednadžbe (2-21).

$$S.E. = 20\log\frac{E_{inc}}{E_{trans}},$$

(2-21)

Tako da se učinkovitost oklapanja beskonačne ploče dobrog vodiča izvodi formulom (2-22).

$$S.E. = 20 * log\frac{\eta_0}{4 * \eta_S} + 20 * loge^{\frac{t}{\delta}} = R(dB) + A(dB)$$

(2-22)

Ukupna učinkovitost oklapanja se promatra u dva termina. Gubitak refleksije **R**(dB) je gušenje izazvano reflektiranjem snage od površina. Gubitak absorpcije **A**(dB), to je gušenje izazvano snagom polja koje se pretvara u toplinsku energiju dok propagira kroz materijal. Učinkovitost oklapanja se za različite vrste materijala.

Gubitak refleksijom ne ovisi o debljini oklopa. U potpunosti ovisi o razlici intristične impedancije materijala iz kojeg dolazi val i intristične impledancije materijala u koji val ulazi. Apsorpcija gušenjem je direktno proporcionalna debljini oklopa prikazanog u skin depth-u. [1]

$$A(dB) = 20 * loge^{\frac{-t}{\delta}} \approx 8.7(\frac{t}{\delta})(dB)$$

(2-23)

2.5. Računanje djelotvornosti oklapanja za određeni materijal

Računati ćemo djelotvornost oklapanja za bakar pomoću formula prikazanih u teoriji ravnog vala. Započinjemo računanjem skin depth-a, zanimaju nas više frekvencije pa ćemo uzeti 100 MHz kao referentu frekvenciju na kojoj ćemo vidjeti vrijednost djelotvornosti oklapanja. Provodnjivost bakra je izražena sa σ = 5.7*10^7 [S/m]. Za debljinu bakra možemo uzeti t=0.025 mm što bi predstavljalo bakrenu foliju prema jednadžbi (2-24). [2]

$$\delta_{cu} = \frac{1}{\sqrt{\pi * f * \mu * \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi * (10^8) * (4 * \pi * 10^{-7}) * (5.7 * 10^7)}} = 6.7\mu m$$

(2-24)

Vrijednost debljine materijala je u tom slučaju puno veća od vrijednosti skin depth-a pa se može računati efikasnost oklapanja.

Gubitak snage apsorbcijom se računa prema jednadžbi (2-25).

$$A(dB) \approx 8.7\left(\frac{t}{\delta}\right) = 8.7\left(\frac{50.8}{6.7}\right) = 66\ dB\ .$$

(2-25)

Za izračun gubitka snage reflektiranjem **R**, treba dobiti vrijednost intristične impedancije barka za zadanu frekvenciju prema jednadžbi (2-26).

$$\left|\eta_{cu@100\,MHz}\right| = \sqrt{\frac{2\pi f\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{2\pi\left(10^8\right)\left(4\pi\times10^{-7}\right)}{5.7\times10^7}} = 3.7\times10^{-3}\ ohms\ .$$

(2-26)

Pomoću intristične impedancije dobiva se vrijednost gubitaka snage refleksijom **R** (dB), prikazano jednadžbom (2-27).

$$R\left(dB\right) = 20\log\frac{\eta_0}{4\eta_s} = 20\log\frac{377}{4\left(3.7\times10^{-3}\right)_s} = 88\ dB\ .$$

(2-27)

Ukupna efikasnost oklapanja je tada suma gubitka snage refleksijom i gubitka snage apsorbcijom prema jednadžbi (2-28).

$$S.E. = 88\ dB + 66\ dB \approx 154\ dB\ .$$

(2-28)

Efektivnost oklapanja je u ovom slučaju vrlo visoka, jer je debljina barka u ovom slučaju velike vrijednosti, pa je za mjerenu frekvenciju materijal neprobojan, gotovo se sva snaga apsorbirala propagirajući kroz materijal. U slučaju kada imamo vrlo niske vrijednosti debljine materijala dio snage je prenesen (Sl. 2.10) a dio snage se reflektirao nazad u materijal što može dovesti do višestrukih refleksija od granica unutar materijala, takva snaga koja se odbije od granicu unutar materijala se ponovo propagiranjem apsorbira u materijal. Tako nastaje višestruko reflektiranje snage nazad u materijal koje traje dok se snaga ne apsorbira unutar materijala. Takva pojava višestrukog odbijanja unutar materijala smanjuje djelotvornost oklapanja. Računa se tako da se u formulu za efikasnost oklapanja uvede vrijednost gubitka snage obijanjem B (dB). Isto tako važno je napomenuti da se gubitak snage odbijanjem izražava kao negativna vrijednost, što znači da smanjuje efikasnost oklapanja. Jedna od metoda mjerenja efikasnosti oklapanja je da se mjerenja vrše tako da se mjeri primnjeno električno polje bez oklopa i sa oklopom. Puno faktora utječe na efikasnost oklapanja kao što su veličina, oblik i debljina oklopa, materijal od kojega je napravljen i položaj izvora koji utječe na točku mjerenja. U tom slučaju efikasnost oklapanja se računa prema jednadžbi (2-29).[2]

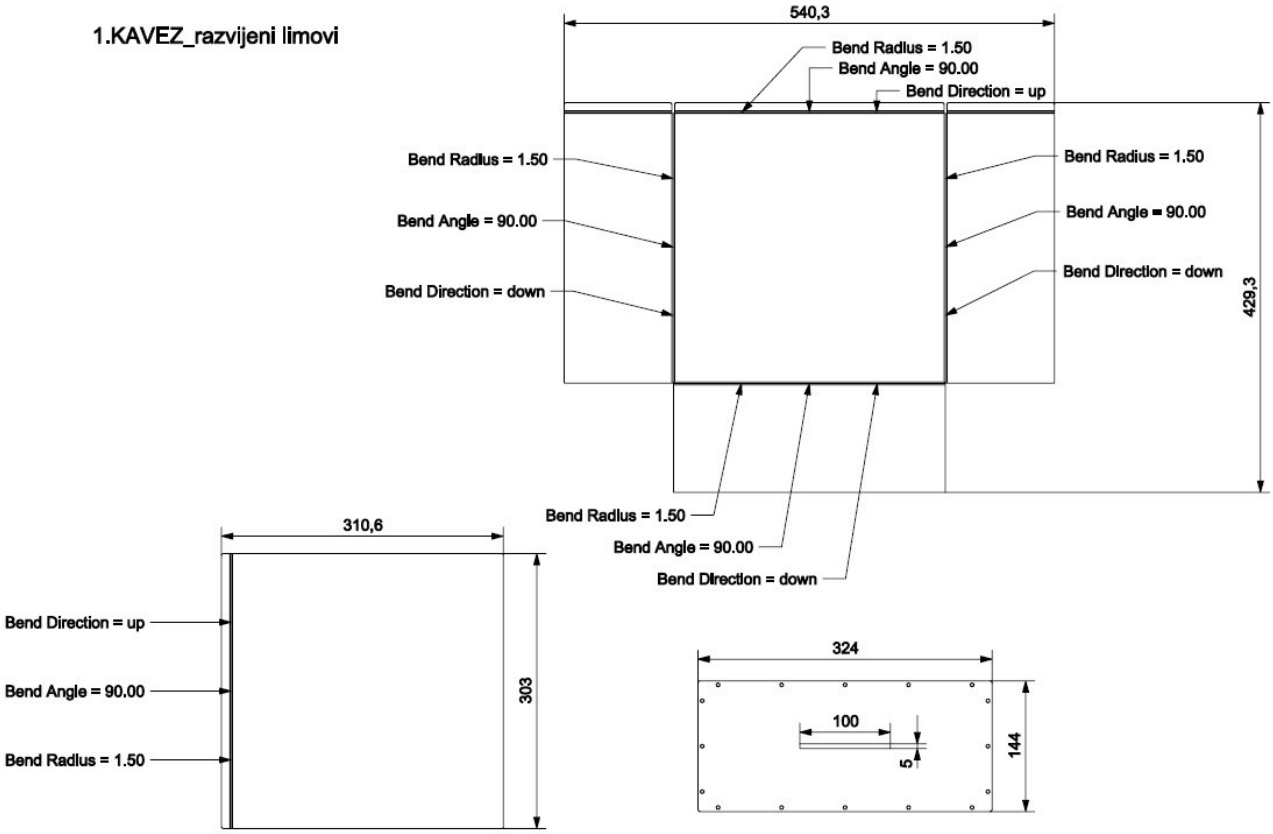
$$S.E. = R(dB) + A(dB) + B(dB) \tag{2-29}$$

3. IZRADA KUĆIŠTA

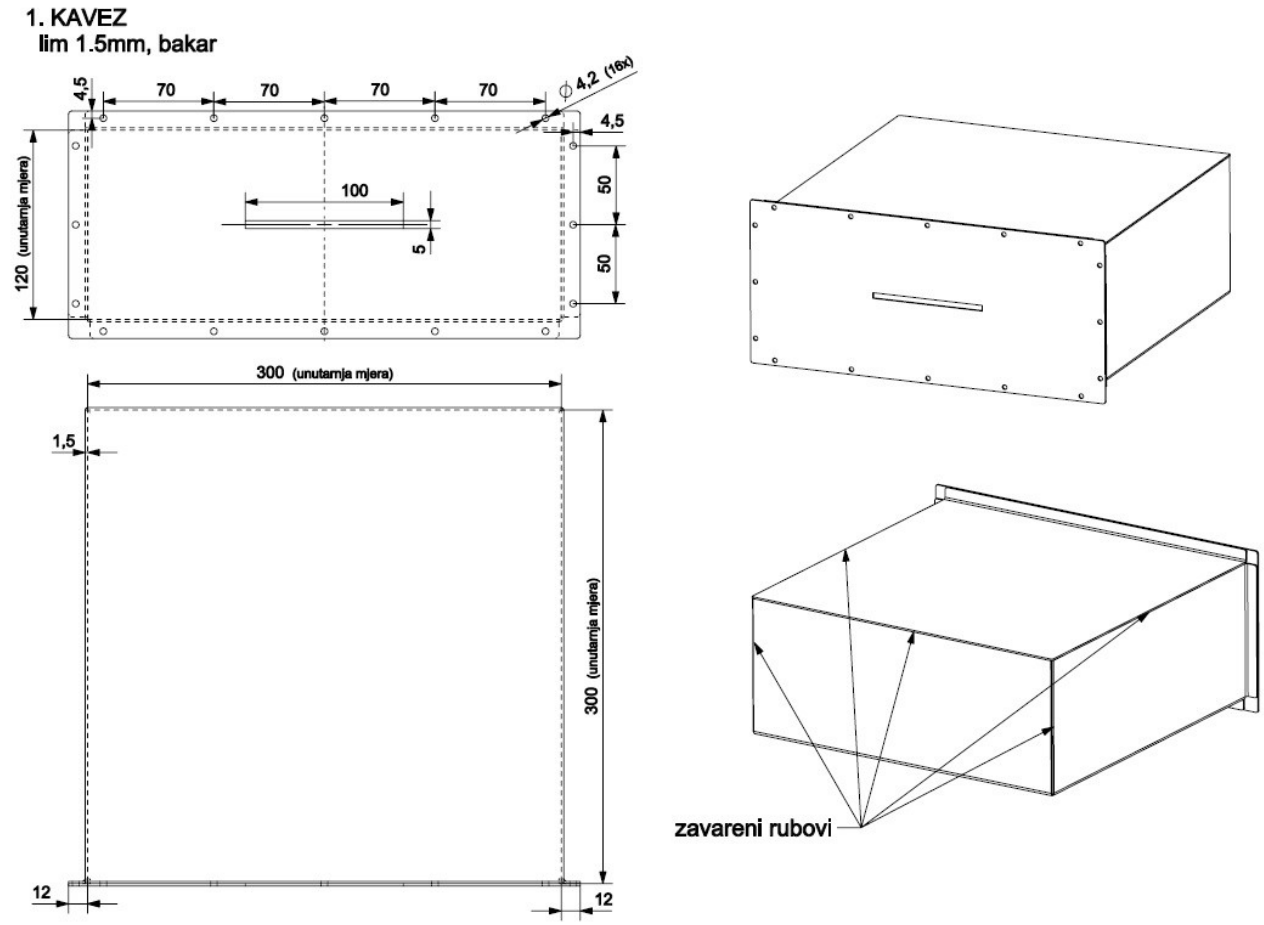
Potrebno je izraditi dva bakrena kućišta na kojima će se mjeriti djelotvornost oklapanja. Kod nabavke bakra, moguće je naručiti ploče od dva metra kvadratna, točnije dimenzija (2x1) m, u ovom slučaju izrade kućišta je bilo potrebno uzeti jednu ploču debljine 2 mm i drugu ploču debljine 1.5 mm. Svojstva materijala bakra ne dopuštaju rezanje i bušenje običnim alatima, stoga je bakar rezan posebnim CNC strojem koji radi na principu rezanja metala vodom i pijeskom. Bakar se ne može laserski rezati jer mu je refleksija zrake velika što čak može prouzročiti kvar stroja za lasersko rezanje. Potrebno je dobiti što veću preciznost izrade kako bi rezultati mjerenja efikasnosti oklapanja bili referenti određenim očekivanjima. Zadane dimenzije kućišta se odnose na unutrašnji volumen kućišta. Nakon što je bakar izrezan, potrebno ga je saviti do razine da se plohe nalaze u željenom obliku kako bi bilo moguće što preciznije zavariti kućišta. CNC stroj reže plašt kućišta i gornju ploču koja će biti zavarena, isto tako reže i prednju ploču ne ovisno sa plaštom koja na sebi ima otvor, stranice na koje se šarafi prednja ploča sa otvorom također se savijaju i buše se rupe za vijke. Dok su rupe na prednjoj plohi sa otvorom izbušene ručno, rezultat je precizniji kod takve metode bušenja jer prilikom savijanja se treba uzeti u obzir razmak koji će izmjeniti nakon savijanja. Otvori za vijke na prednjoj ploči koja se skida su izvan kućišta tako da ne utječu na samu unutrašnjost kućišta. Kako bi na rubovima gdje je potrebno variti ostala ista provodnjivost, kućišta su varena posebnom legurom srebra i bakra, srebro dobro spaja bakar. Bakar reagira na temperaturu pa se na mjestima gdje je varen boja barka malo svijetlija.

3.1. Izrada prvog kućišta

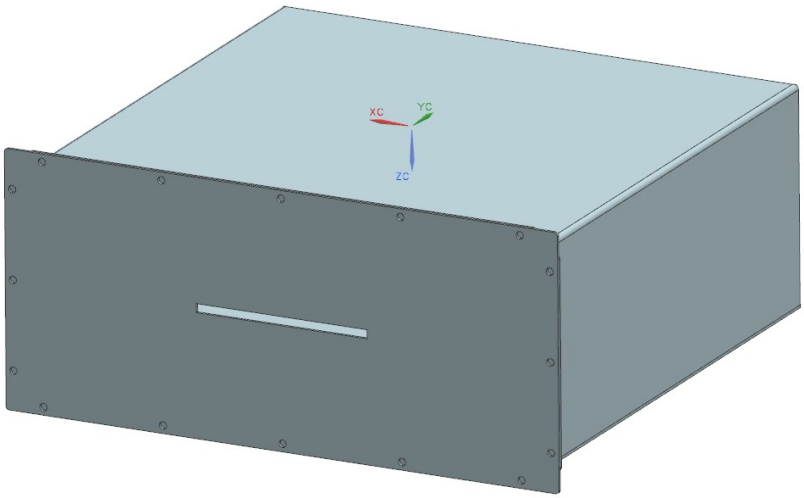
Prvo kućište treba izraditi u dimenzijama (300x300x120) mm, gdje su referentne stranice (AxBxC). Kućite na prednjoj plohi dimenzija (300x120) mm, treba imati otvor dimenzija (100x5) mm, simetrično postavljen u sredini na jednoj strani. Stranica sa otvorom se treba skidati i šarafiti na kućište. Debljina bakra cijelog kućišta je 1.5mm. Kućište je od bakra (Cu). Prijemna monopol antena se postavlja u centar kućišta na plohi dimenzija (300x300). Na slikama Sl. 3.1. i Sl. 3.2. je prikazana tehnička priprema rezanja i savijanja prvog kućišta.



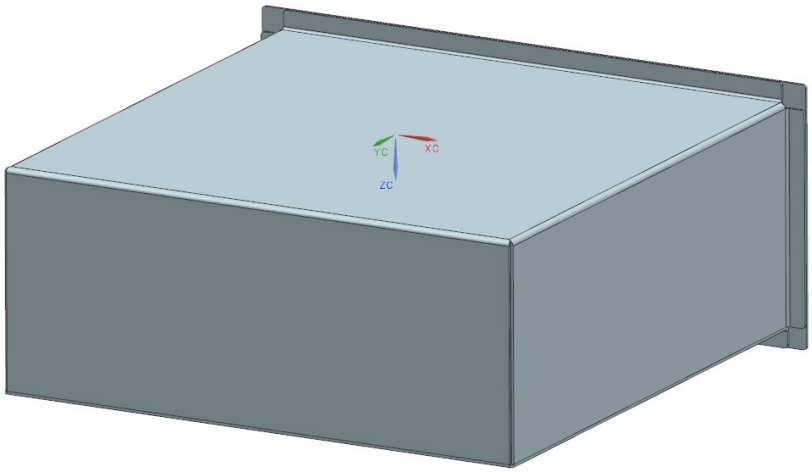
Sl. 3.1. *Prikaz razvijenih limova i parametri savijanja.*



Sl. 3.2. *Prikaz sklopa prvog kućišta.*



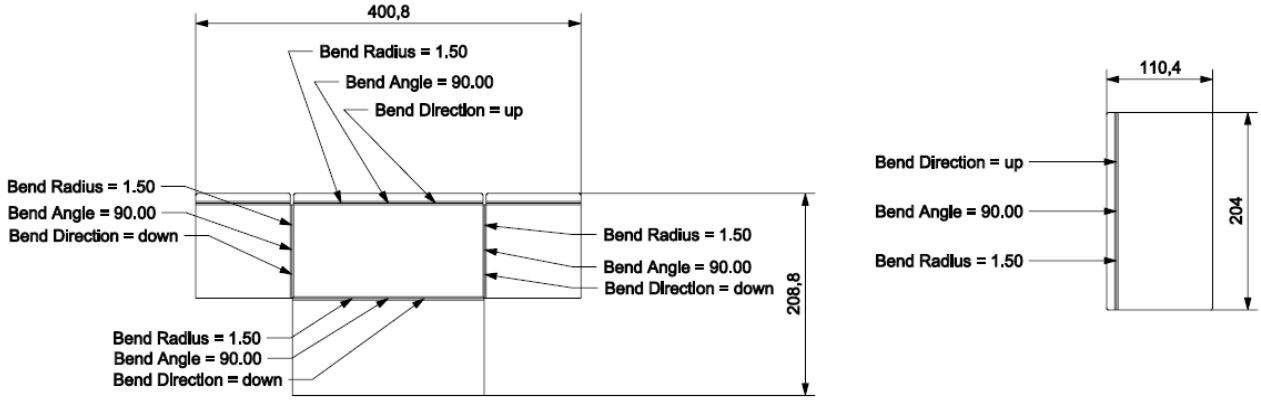
Sl. 3.3. *3D prikaz kućišta sa prednje strane.*



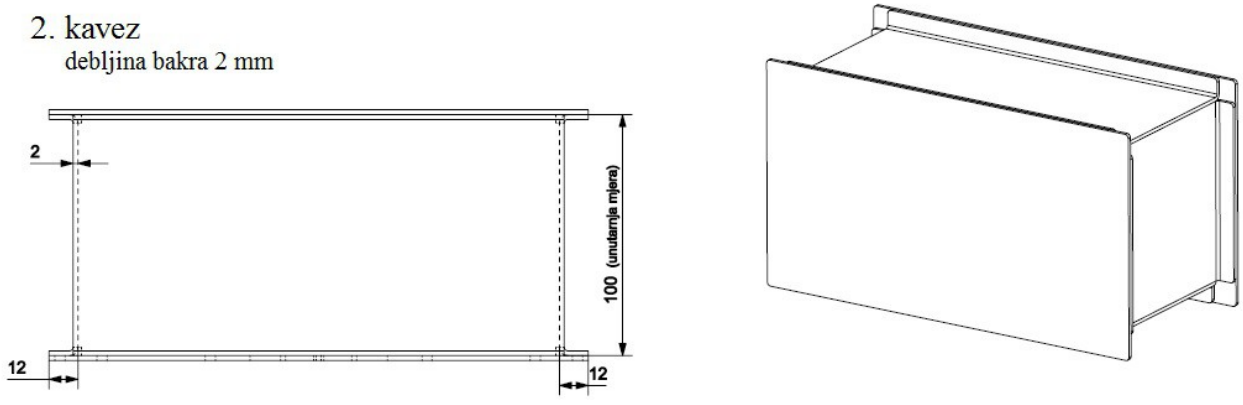
Sl. 3.4. *3D prikaz kućišta sa stražnje strane.*

3.2. Izrada drugog kućišta

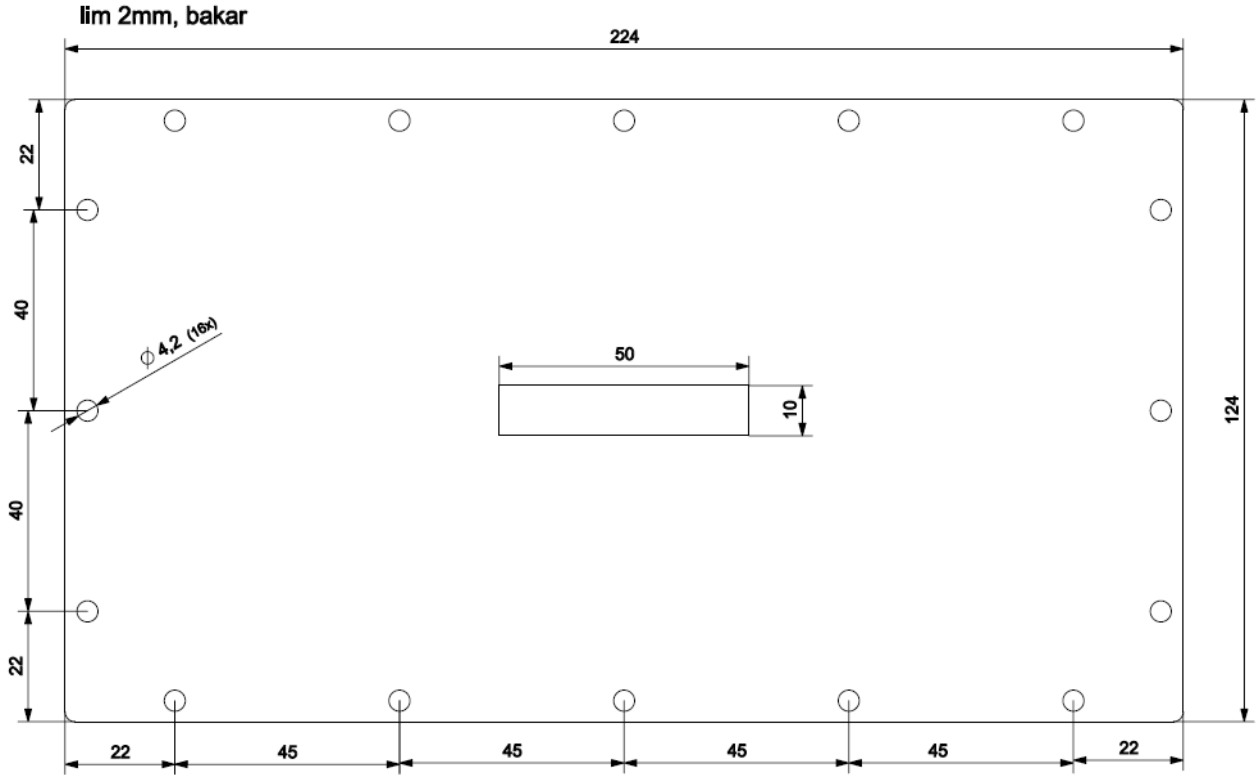
Drugo kućište treba izraditi u dimenzijama (200x100x100) mm, gdje su referentne stranice (AxBxC). Kućište na prednjoj plohi dimenzija (200x100) mm, treba imati otvor dimenzija (50x10) mm, simetrično postavljen u sredini na jednoj strani. Stranica sa otvorom se treba skidati i šarafiti na kućište. Debljina bakra cijelog kućišta je 2 mm. Kućište je od bakra (Cu). Prijemna monopol antena se postavlja u centar kućišta na plohi dimenzija (200x100). Na drugom kućištu je potrebno skidati i šarafiti prednju plohu sa otvorom, i plohu nasuprot prednjoj plohi koja nema otvor, tj. stažnja ploha je od punog bakra bez otvora, otvori za vijke su postavljeni slično kao i na prvom kućištu, samo u ovom slučaju zbog drugačijih dimenzija kućišta otvori za vijke su postavljeni sa manjim razmakom, otvori za vijke ne utječu na unutrašnjost kućišta koja mora ostati glatka. Prijemna antena se namješta tako da samo štapni monopol se nalazi u unutrašnjosti kućišta, te da je ostatak unutrašnjosti kućitša ravan, bez ikakvih reljefa. Na slici je prikazana tehnička priprema rezanja i savijanja drugog kućišta (Sl. 3.5.) i (Sl.3.6.).



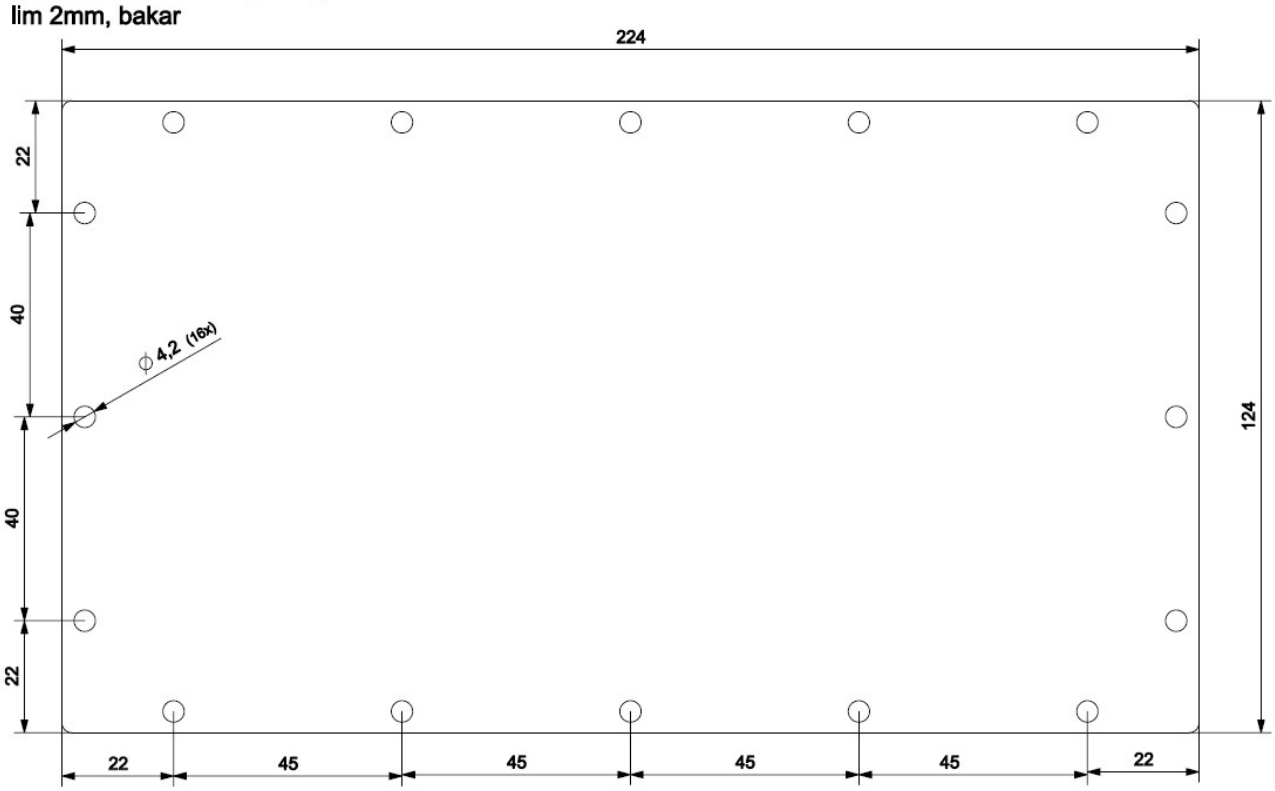
Sl. 3.5. *Razvijeni limovi i parametri savijanja drugog kućišta.*



Sl. 3.6. *Prikaz sklopa drugog kućišta.*



Sl. 3.7. *Prednja ploha drugog kućišta.*



Sl. 3.8. *Stražnja ploha drugog kućišta.*

4. MJERENJE DJELOTVORNOSTI OKLAPANJA

4.1. Oprema korištena za mjerenje djelotvornosti oklapanja

Signalni generator

Signalni generator je elektronički uređaj koji generira ponavljajući ili ne ponavljajući elektronički signal koji može biti u digitalnoj ili analognoj domeni. Postoji više vrsta signalnih generatora sa raznim vrstama namjena. Neke od vrsta generatora ovisno o signalu koje generira su funkcijski generator, RF i mikrovalni signalni generator, pitch generator, digitalni generator i frekvencijski generator. Za potrebe mjerenja djelotvornosti oklapanja se koristi RF i mirovalni signalni generator. Raspon generiranja RF signala je obično u rasponu od 9 kHz do 6 GHz, dok za mikrovalni generator ima frekvencijski raspon nešto manji od 1 MHz do 20 GHz. RF i mikrovalni signalni generator je klasificiran kao analogni ili vektorski signalni generator.

Analogni signalni generator je baziran na oscilirajućem sinusnom valu. RF signalni generator proizvodi kontinuirane valove, izlazna frekvencija može biti namještena na bilo koju frekvenciju unutar frekvenskijog raspona. Mnogi modeli nude različite tipove analogne modulacije, što može uključivati AM (analog modulation), FM (frequency modulation), phase modulation i pulsnu modulaciju. Unutar generatora je ugrađen autenator s kojim se kontrolira izlazna snaga signala.

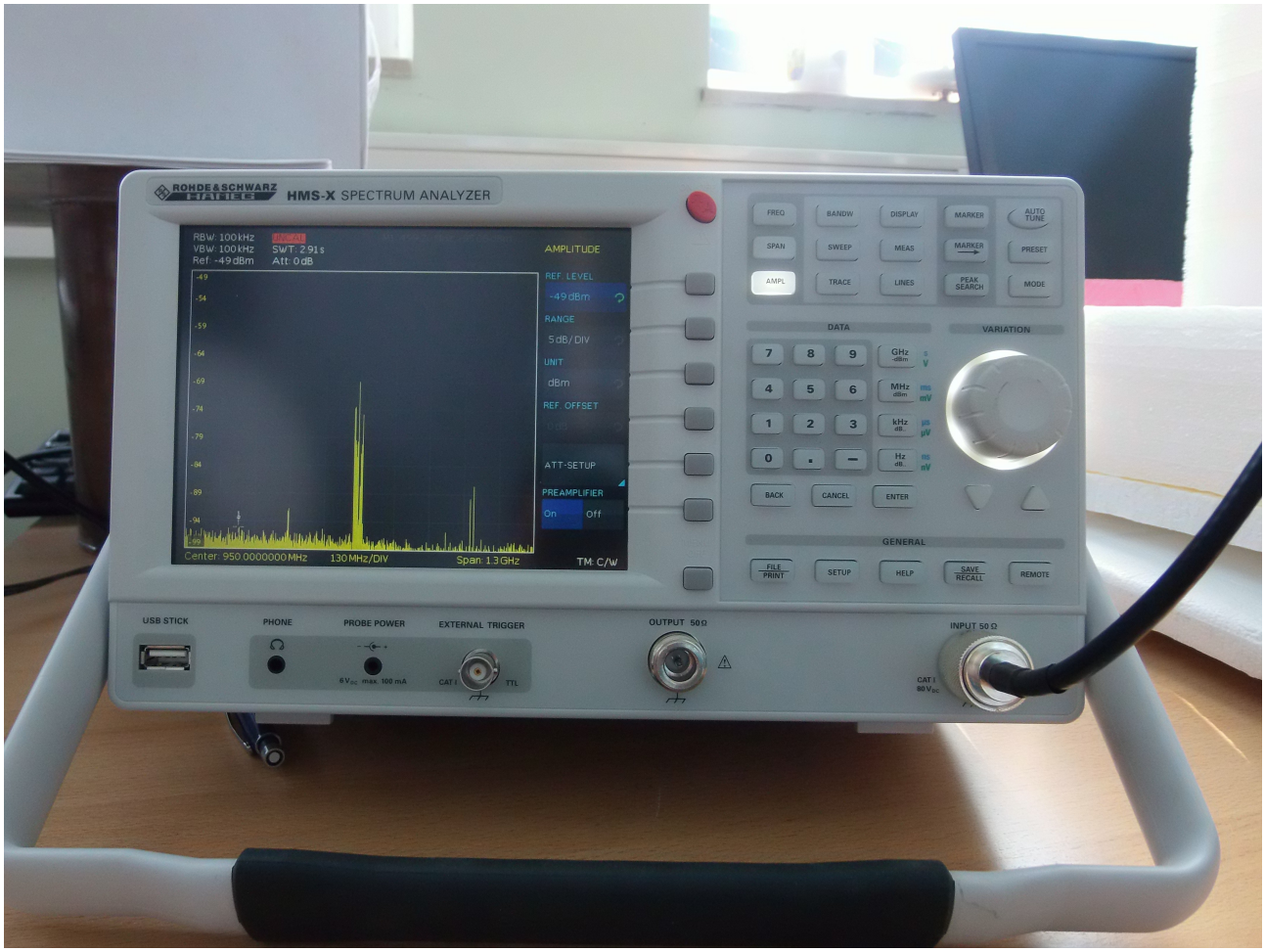
Izlazna snaga može varirati -135 do +30 [dBm], iako zbog donešene odluke o elektromagnetskom zračenju generatori mogu najviše imati amplitudu od +14 [dBm].

Za potrebe mjerenja djelotvornosti oklapanja koristiti će se signalni generator "Agilent" 8648B, koji ima frekvencijski raspon od 9 [kHz] do 2000 [MHz]. Signal koji se generira je amplitudno modeliran i namještana je snaga izlaznog signala na 0.0 [dBm] što je ekvivalent naponu od 1 [mV] odašiljačke snage.[10]

Sl. 4.1. *Signalni generator.*

Spektralni analizator

Koristi se za mjerenje vrijednosti ulaznog signala naspram cijelog frekvencijskog spektra instrumenta. Primarna funkcija je mjerenje snage spektra signala, ulazni signal koji spektralni analizator mjeri je električni. Analiziranjem spektra električnog signala se dobivaju vrijednosti dominantne frekvencije, snage na određenim dijelovima spektra, distorzije, harmonici u određenom pojasu širine spektra, takvi se parametri najviše koriste za karakterizaciju i dizajniranje predajnika.
Na displayu spektralnog analizatora je na vodoravnoj osi prikazana frekvencija, a na okomitoj osi je prikazana amplituda. Tako da sa spektralnog analizaora očitavamo razne amplitude na raznim frekvencijama. Spektralni analizator radi na način da pusti klizeći signal promijenjive frekvencije kroz određeni spektar i prema input signalu očitava amplitude na tim frekvencijama. Takvim mjerenjem se dobiva frekvencijski odziv.Uređaj koji je korišten za mjerenje je Rohde & Schwarz HAMEG HMS-X spectrum analyzer. Za potrebe mjerenja djelotvornosti oklapanja spektralni analizator je namješten na frekvencijski raspon od 300 [MHz] do 1.6 [MHz], što su ujedno i granične frekvencije spektralnog analizatora s kojim je obavljeno mjerenje.[11]



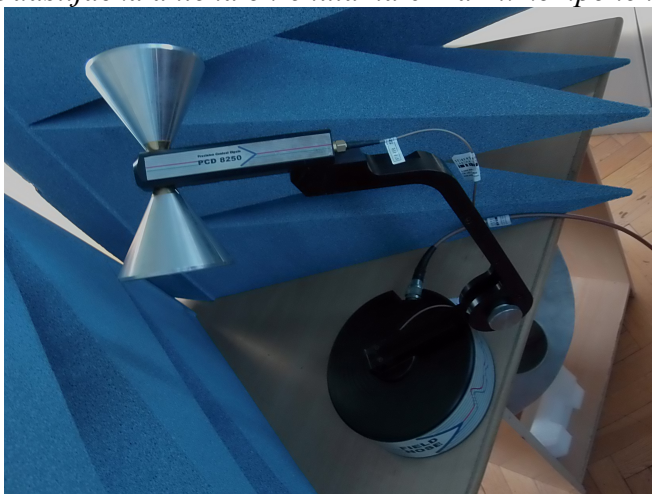
Sl. 4.2. *Spektralni analizator.*

Odašiljačka antena

Za odašiljačku antenu je korištena Precision conical Dipole PCD 8250 antena, ili konusni dipol antena. Frekvencijski raspon antene je od 80 [MHz] do 3 [GHz].

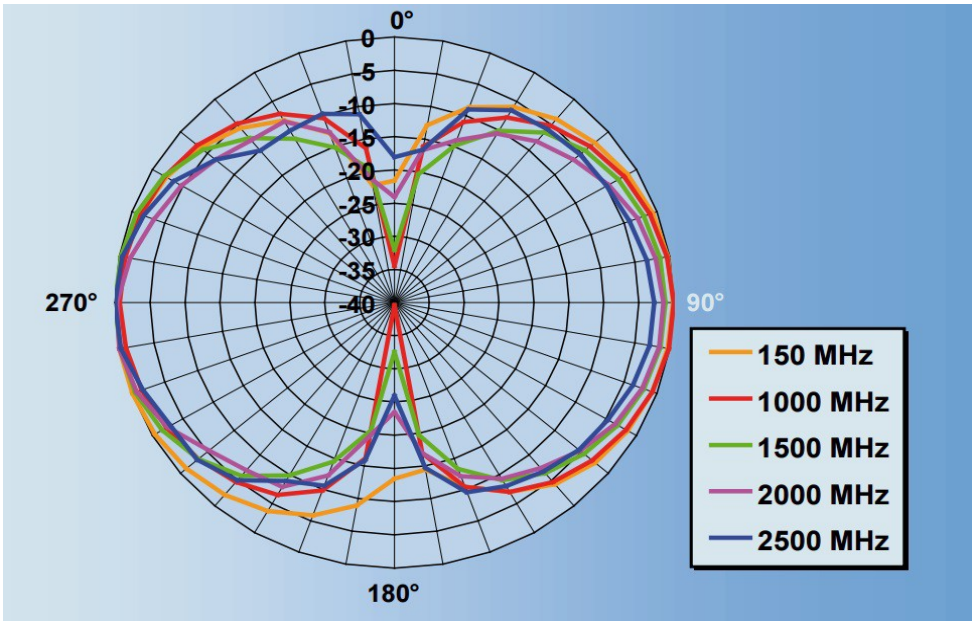
Antena je korištena za odašiljanje polja u x, y i z polarizaciji. Mogućnost antene da se rotira na postolju na kojem je pričvršćena omogućuje usmjerenost dipola za odašiljanje signala u raznim polarizacijama. Antenu u postolju okrećemo od 0-240 stupnjeva, da bi dobili ukupno polje koje antena zrači uzete su rotacije antene na 0, 120 i 240 stupnjeva, kako bi se obuhvatile Ex, Ey, Ez komponente polja. Na slikama su prikazani kutovi okretanja antene, za vrijednost od 120° antena se nalazi na srednjoj poziciji između 0° i 240°.[12]

Sl. 4.3. *Odašiljačka antena okrenuta na 0° za Ex komponentu polja.*



Sl. 4.4. *Odašiljačka antena okrenuta na 240° za Ez komonentu polja.*

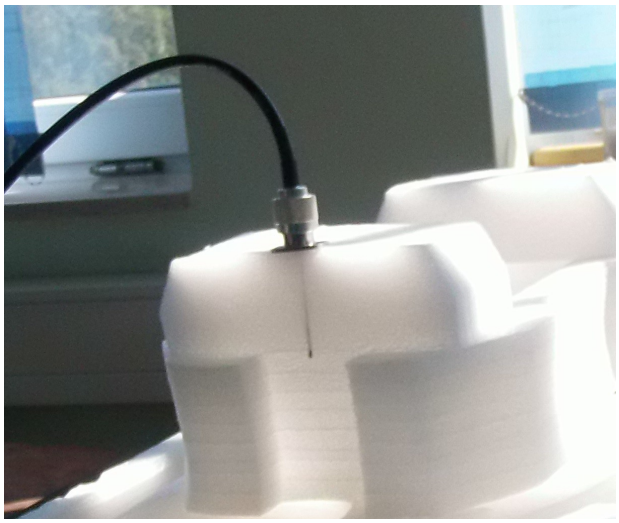
Dijagram zračenja antene dan je na slici (4.5.). Kako antenu zakrećemo u opsegu od 0°do 240° dipol antena se vrti u mjestu i na sve tri pozicije pokriva kompletan dijagram zračenja, što je potrebno za izračunavanje ukupnog polja zračenja.



Sl. 4.5. *Dijagram zračenja odašiljačke dipol antene.*

Prijemna antena

Prijemna antena korištena za mjerenja djelotvornosti oklapanja je monopol antena. Monopol antena je klasa radio antene koja se sastoji od ravnog štapnog vodiča pričvršćenog na određenu vodljivu površinu koja predstavlja uzemljenu ravninu. Razlikuje se od dipol antene po tome što dipol ima dva identična štapna vodiča gdje je signal doveden između dvije polovine antene. Monopol antena je rezonantna antena, štapni vodič funkcionira kao otvoreni rezonator za radio valove, oscilirajući sa stojnim valovima napona i struje kroz cijelu njenu duljinu. Duljina antene je određena valnom duljinom radio vala za koji se koristi.[13]

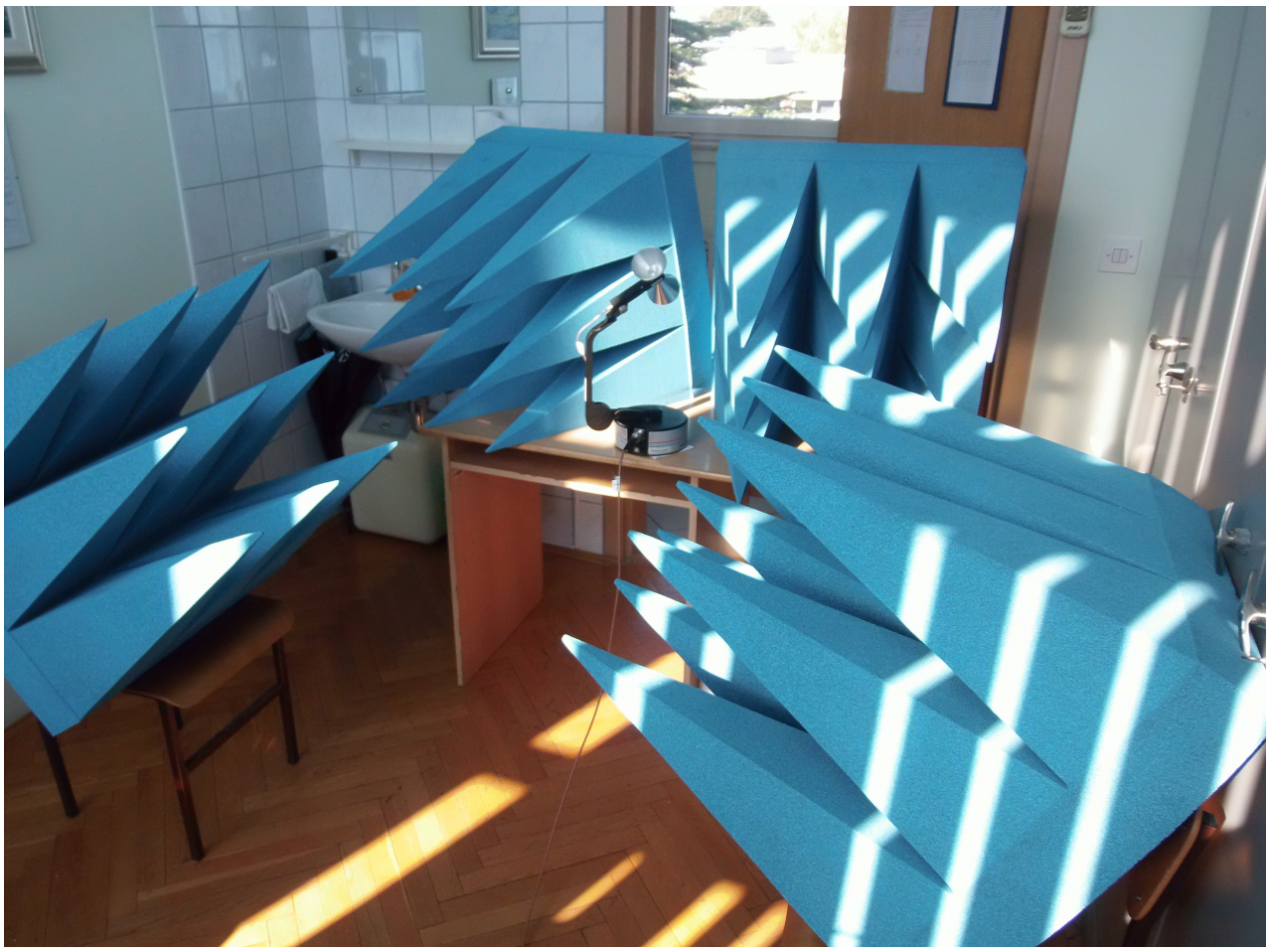


Sl. 4.6. *Prijemna monopol antena.*

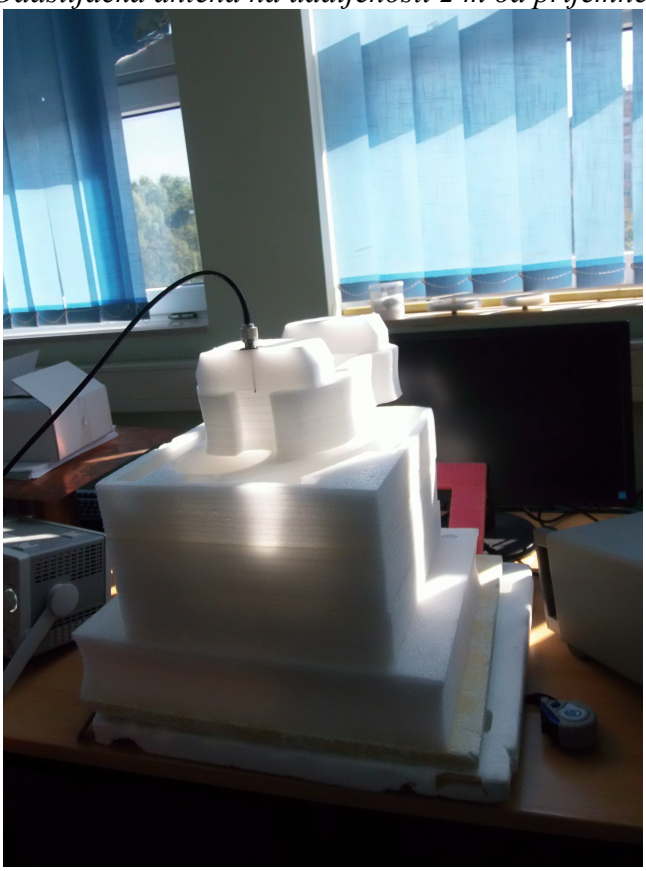
4.2. Mjerenje djelotvornosti oklapanja prvog kućišta

Mjerenje djelotvornosti se obavlja računanjem snage polja na mjestu prijemne antene u slučaju kada je antena u slobodnom prostoru i kada je antena oklopnjena kućištem dimenzija (300x300x120). Za mjerenje je potrebno signalni generator (Agilent 8648B) spojiti na odašiljačku antenu (Precision conical Dipole PCD 8250), a spektralni analizator (Rohde & Schwarz HAMEG HMS-X) je potrebno spojiti na prijemnu monopol antenu. Duljina monopol antene je 5,35 [cm], a njen radijus r=0.6 [mm]. Za mjerenje djelotvornosti oklapanja kod prvog kućišta razmak između prijemne i odašiljačke antene je 2 [m], visina od tla prijemne i odašiljačke antene je 1.15 [m]. Mjerenje se obavlja u frekvencijskom rasponu od 500 [MHz] do 1500 [MHz] sa korakom od 50 [MHz] za frekvencije od 500 [MHz] do 550 [MHz] te za frekvencije od 1000 [MHz] do 1200 [MHz], za sve ostale frekvencije korak je 25 [MHz], s tim da je preskočen frekvencijski opseg u kojem se nalaze GSM mreže 900 [MHz] do 960 [MHz], frekvencije podešavamo na signalnom generatoru koji je spojen na odašiljačku antenu. Mjerenja vršimo za tri komponente polja na istoj frekvenciji, komponente polja mjenjamo rotiranjem odašiljačke dipol antene na 0°, 120°, 240° za Ex, Ey i Ez komponentu polja, tako da se za jednu frekvenciju dobivaju tri vrijednosti polja. Mjerenja se rade za oba slučaja kada je antena oklopljena i kada je u slobodnom prostoru. Kako bi se smanjile refleksije elektromagnetnih valova korišteni su apsorberi postavljeni oko odašiljačke antene, iako bi za visoko precizna mjerenja prostor u cijelosti trebao biti tretiran apsorberima, rezultati djelotvornosti oklapanja su vidljivi.

Sl. 4.7. *Mjerenje djelotvornosti oklapanja za prvo kućište.*



Sl. 4.8. *Odašiljačka antena na udaljenosti 2 m od prijemne antene.*



Sl. 4.9. *Monopol antena u slobodnom prostoru na udaljenosti 2 m od odašiljačke antene.*

Dobiveni rezultati sve tri komponente polja su dani u prilogu (P.4.1. - P.4.6.). Računa se ukupna snaga polja na prijemnoj anteni u slobodnom prostoru i kada se antena nalazi oklopljena u kućištu. Nakon što je izmjerena snaga u [dBm] za svaku komponentu polja okretanjem odašiljačke antene, potrebno je izračunati ukupnu snagu polja u [W] za sve tri komponente polja, te nakon toga je potrebno ukupnu snagu polja u [W] pretvoriti u [dBm] kako bi izrazila razlika ukupne snage polja kada je antena oklopnjena i kad je u slobodnom prostoru, ta vrijednost predstavlja djelotvornost oklapanja izraženu u decibelima [dB].

Snagu jedne komponente polja izraženu u [dBm] pretvaramo u snagu izraženu u vatima [W] pomoću jednadžbe (4-1).

$$P[dBm] = 10 * log\frac{P(W)}{1 * 10^{-3}} \tag{4-1}$$

Za računanje snage u [W] formulu transformiramo prema jednadžbi (4-2).

$$P[W] = 1 * 10^{-3} * e^{\frac{P[dBm]}{10}} \tag{4-2}$$

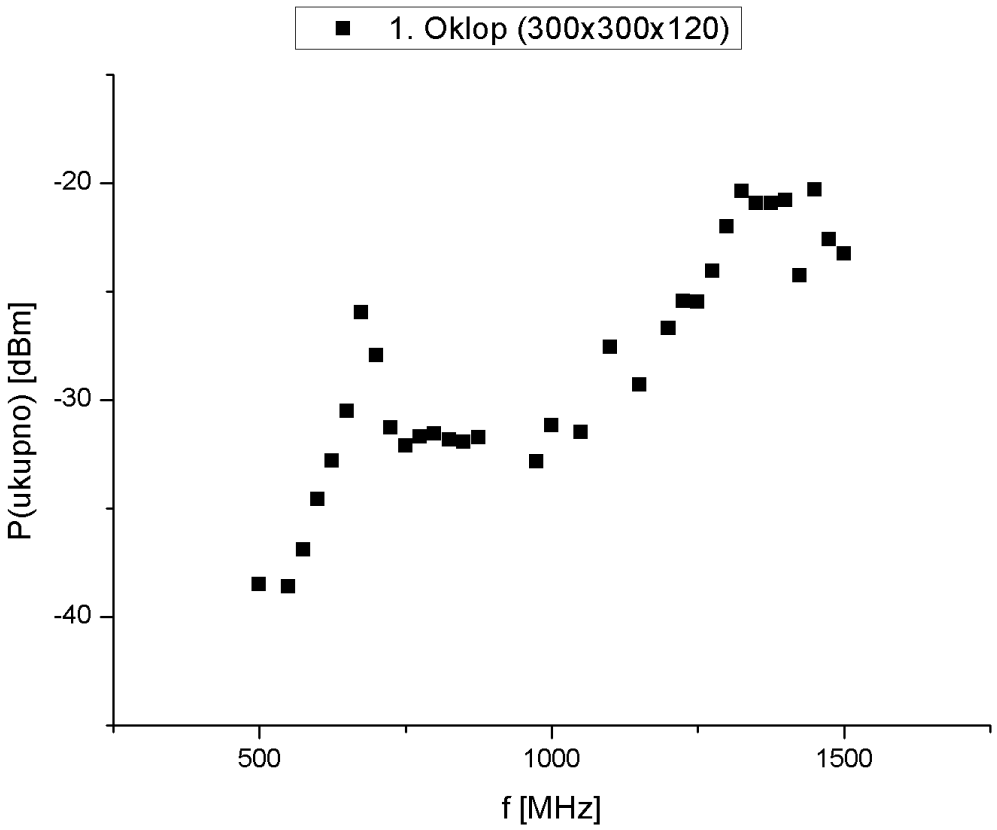
Nakon što izračunamo snagu u [W] za svaku komponentu polja, računamo ukupnu snagu polja na mjestu prijemne antene za sve tri komponente polja prema jednadžbi (4-3).

$$P_{\Sigma} = \sqrt{P_0{}^2 + P_{120}{}^2 + P_{240}{}^2}[W] \tag{4-3}$$

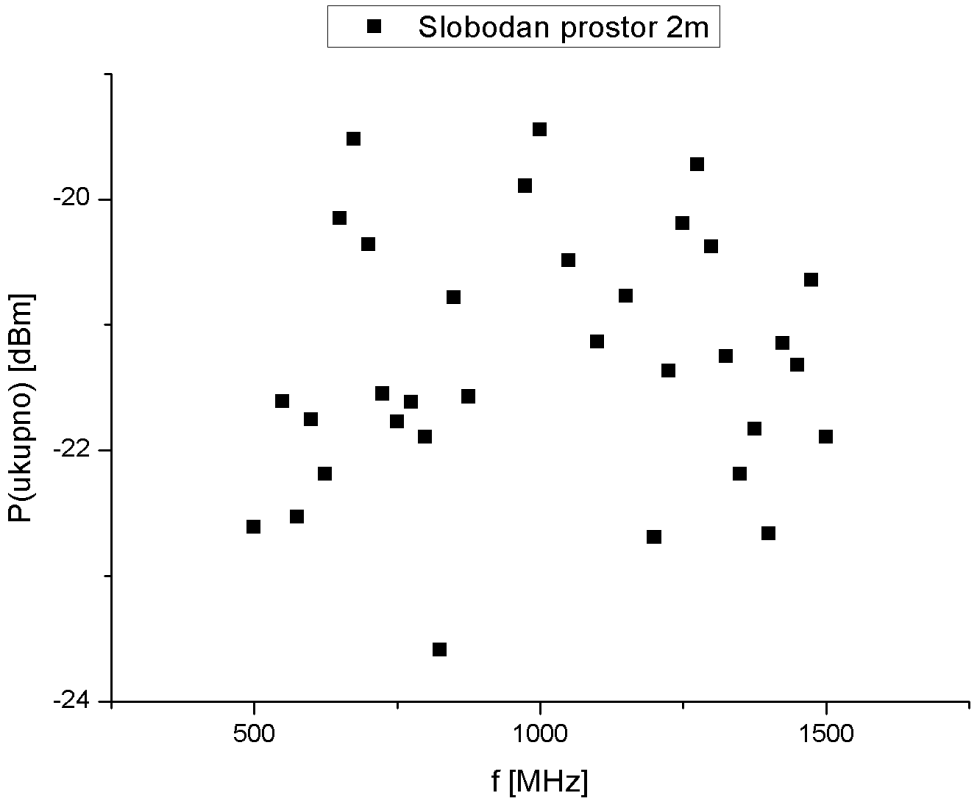
Ukupnu snagu polja jedne frekvencije pretvaramo u [dBm] kako bi mogli računati djelotvornost oklapanja izraženog u decibelilma prema formuli (4-4).

$$P_{\Sigma}[dBm] = 10 * log\frac{P_{\Sigma}[W]}{1 * 10^{-3}} \tag{4-4}$$

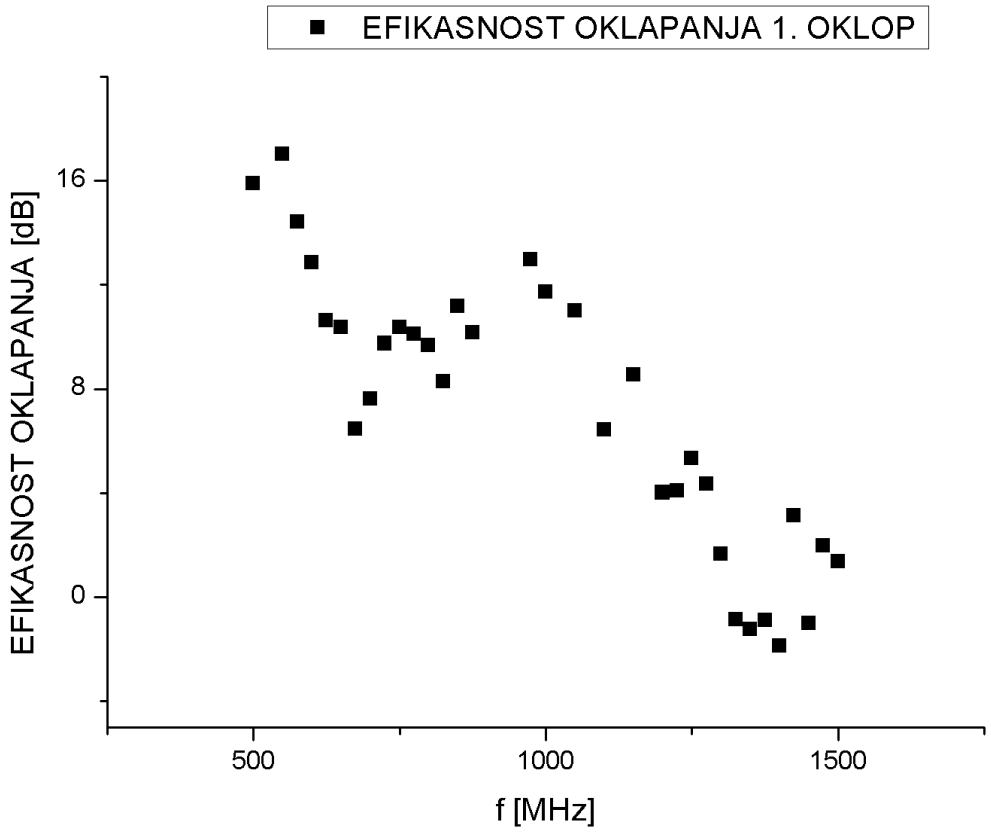
Nakon što je dobiveno ukupno polje za određenu frekvenciju, razlika ukupne snage oklopnjene antene i antene u slobodnom prostoru predstavlja djelotvornost oklapanja izraženu u decibelima [dB].



Sl. 4.10. *Graf prikazuje snagu polja na određenoj frekvenciji kada je prijemna antena oklopnjena.*



Sl. 4.11. *Graf snage polja na određenim frekvencijama kada se prijemna antena nalazi u slobodnom prostoru.*



Sl. 4.12. *Graf djelotvornosti oklapanja izražen kao razlika ukupne snage na prijemnoj anteni kada je antena oklopnjena i ukupne snage na prijemnoj anteni kada se nalazi u slobodnom prostoru.*

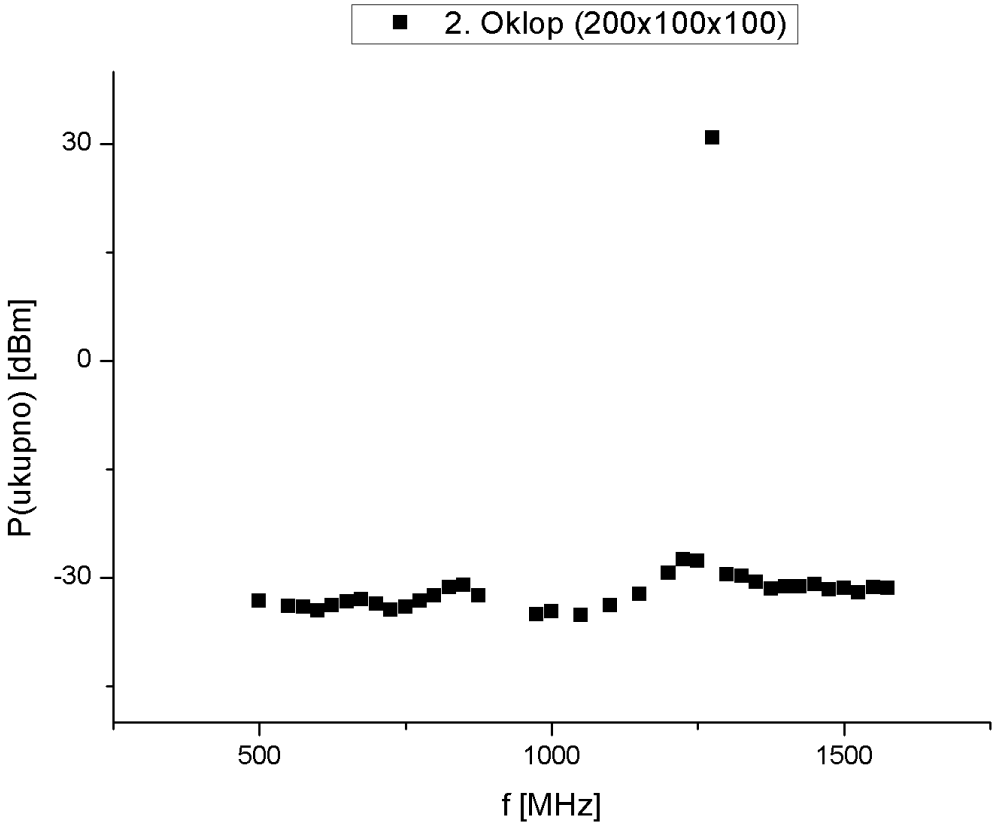
Iz rezultata mjerenja djelotvornosti oklapanja za prvo kućište, možemo vidjeti kako ukupna snaga polja za određene frekvencije je 'stabilnija', nego kod mjerenja ukupnog polja za antenu u slobodnom prostoru. Osim što je vidljivo prigušenje amplidude snage na mjestu prijema u određenim frekvencijama kada je antena oklopljena, također oklop spriječava višestazna prostiranja elektromagnetskih valova sa svih strana koje dolaze na mjesto prijema uslijed fizikanlog utjecaja širenja elektromagnetskih valova. Dok rezultati za mjerenje snage polja na mjestu prijema bez oklopa izgledaju puno 'kaotičnije', prostor u kojemu je obavljeno mjerenje nije idealno pa nastaju interferencije na mjestu prijemne antene. Da bi se dobili što ravnomjerniji rezultati, sama pozicija mjeritelja i okoline bi trebala što više jednaka. Kako bi se mjerenje izvršilo bez fizikalnih utjecaja kod propagacije elektromagnetskog polja, prostor bi trebao biti u potpunosti izoliran apsorberima, i mjeritelji bi trebali biti izvan prostora u kojemu se obavlja mjerenje. Dipol odašiljačka antena ima mogućnost spajanja sa računalom, koje bi zakretalo antenu sa različite komponente polja, kako u prostoru mjeritelj svojim tijelom ne bi poremetio fizikalni utjecaj širenja elektromagnetskih valova. Unatoč ne savršenosti uvjeta mjerenja rezultati oklapanja su vidljivi. Najveća djelotvornost oklapanja za prvo kućište je na frekvencijma od 500 [MHz] do 600 [MHz] i na frekvencijama od 960 [MHz] do 1100 [Mhz]. U slučaju mjerenja djelotvornosti oklapanja za prvo kućište, imamo

pozitivnu interferenciju na frekvencijama oko 1300 [Mhz] prema čemu se može zaključiti da se pozitivna interferencija događa unutar samog kućišta, tako da u rijetkim slučajevima oklop sa otvor može pojačati amplitudu, ali amlituda je frekvencijski selektivno pojačana, moguće je stvoriti takvu vrstu interferencije u ne savršenim uvjetima mjerenja, kada se točan razmak i geometrijski parametri za mjerenje ne mogu numerički dobiti u potpunosti točno, što je karakteristično za bilo koje analogno mjerenje u stvarnom sustavu, kada puno parametara utječe na dobivene rezultate.

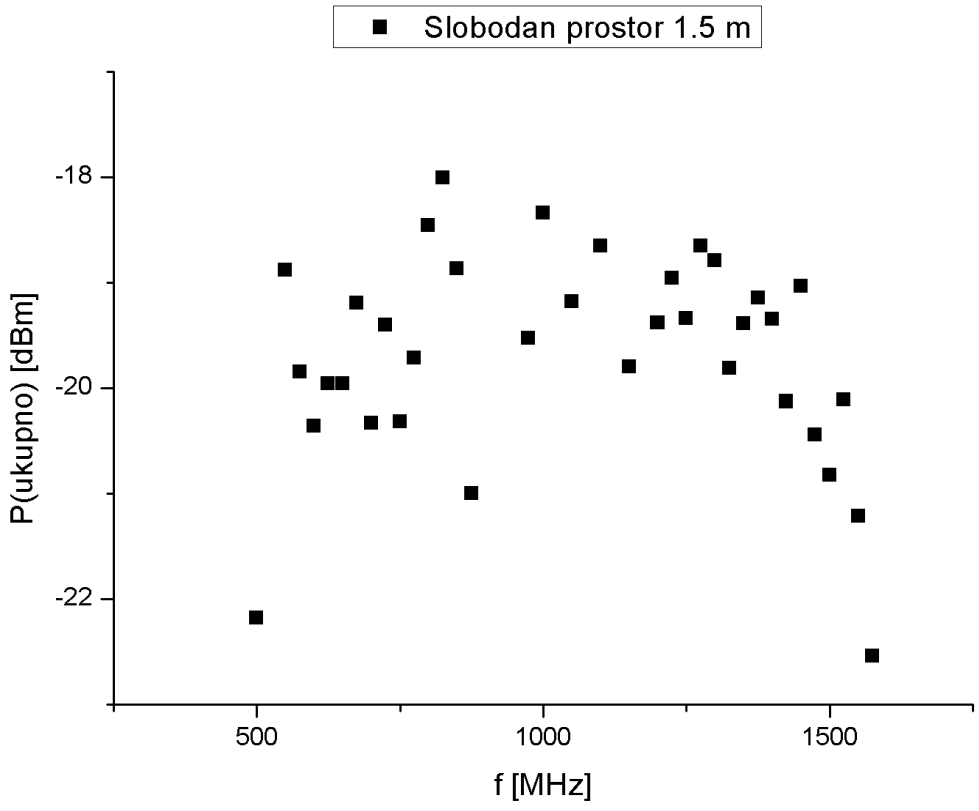
4.3. Mjerenje djelotvornosti oklapanja drugog kućišta

Mjerenje djelotvornosti se obavlja računanjem snage polja na mjestu prijemne antene u slučaju kada je antenena u slobodnom prostoru i kada je antena oklopnjena kućištem dimenzija (200x100x100). Za mjerenje je potrebno signalni generator (Agilent 8648B) spojiti na odašiljačku antenu (Precision conical Dipole PCD 8250), a spektralni analizator namješten za frekvencijski raspon od 450 [MHz] do 1600 [MHz] (Rohde & Schwarz HAMEG HMS-X) je potrebno spojiti na prijemnu monopol antenu. Duljina monopol antene je 5,35 [cm], a njen radijus r=0.6 [mm]. Za mjerenje djelotvornosti oklapanja kod drugog kućišta razmak između prijemne i odašiljačke antene je 1.5 [m], visina od tla prijemne i odašiljačke antene je 1.15 [m]. Mjerenje se obavlja u frekvencijskom rasponu od 500 [MHz] do 1600 [MHz] sa korakom od 50 [MHz] za frekvencije od 500 [MHz] do 550 [MHz] i za frekvencije od 1000 [MHz] do 1200 [MHz] za sve ostale frekvencije korak je 25 [MHz], s tim da je preskočen frekvencijski opseg u kojem se nalaze GSM mreže 900 [MHz] do 960 [MHz], frekvencije podešavamo na signalnom generatoru koji je spojen na odašiljačku antenu. Rezultati mjerenja su dani u prilogu (P.4.7. - P.4.12.), jednako se odnose kao i za prvo kućište, računa se ukupno polje na prijemnoj anteni kada je ona oklopnjena i kada je u slobodnom prostoru, te nakon toga se računa razlika u snazi ukupnog polja na određenoj frekvenciji kada je antena oklopljena i kada je u slobodnom prostoru.

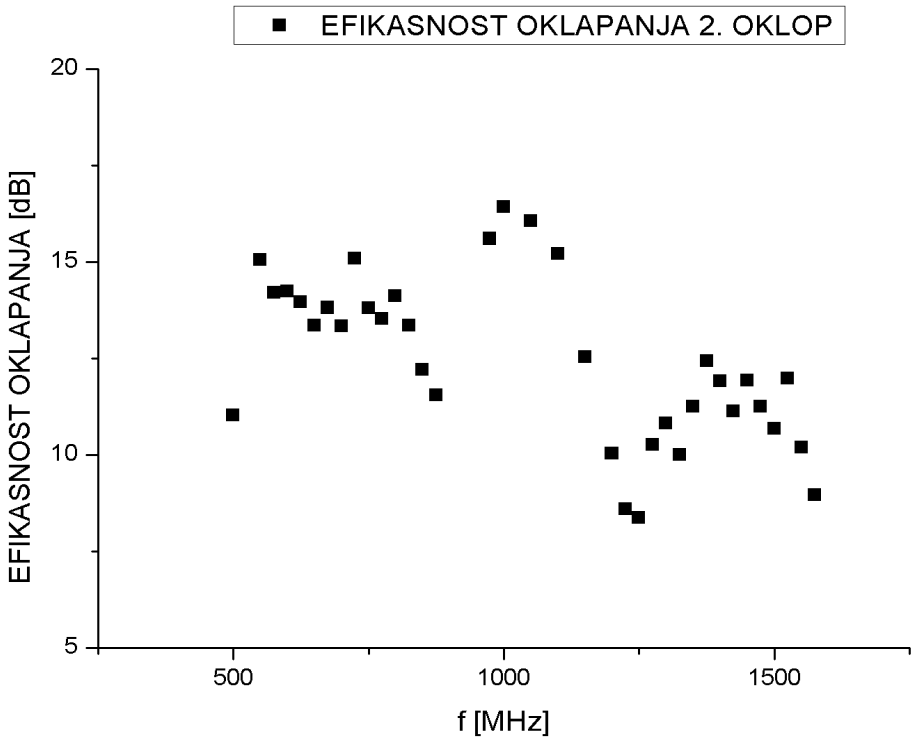
Sl. 4.13. *Mjerenje djelotvornosti oklapanja drugog kućišta.*



Sl. 4.14. *Graf prikazuje ukupnu snagu polja na određenoj frekvenciji kada je antena oklopljena.*



Sl. 4.15. *Ukupna snaga polja na oređenim frekvencijama kada je prijemna antena u slobodnom prostoru na udaljenosti od 1.5 [m] od odašiljačke antene.*



Sl. 4.16. *Djelotvornost oklapanja predočena kao razlika ukupne snage na mjestu prijema kada je antena u slobodnom prostoru i kada je oklopljena na udaljenosti od 1.5 [m] od odašiljačke antene.*

Mjerenje djelotvornosti oklapanja za drugo kućište je pokazalo 'stabilnije' i bolje rezultate. Razlika pri mjerenju djelotvornosti oklapanja drugog kućišta naspam mjerenja prvog kućišta, je u tome da je za mjerenje drugog kućišta razmak između odašiljačke i prijemne antene bio 1.5 [m] što je 0.5 [m] bliže nego kod mjerenja prvog kućišta, amplitude polja zračenja su veće što je razmak između antena manji. Dimenzije drugog kućišta su manje od prvog, ali debljina bakra drugog kućišta je veća 2 [mm] naspam prvog kućišta 1.5 [mm], što je za 0.5 [mm] deblje od prvog kućišta. Rezultati ukupnog polja kod drugog kućišta kada je antena oklopnja su puno 'stabilniji' i ujednačeniji osim frekvencije od 1300 [MHz] koja uvelike odudara, što može biti posljedica pozivitne interferencije unutar kućišta ili greške u mjerenju. Amplitude ukupne snage zračenja za frekvencije na cijelom mjerenom spektru su oko -30 [dBm]. Za mjerenje snage ukupnog polja zračenja kada je antena u slobodnom prostoru dobivamo 'kaotične' rezultate za pojedine frekvencije, vrijednosti nisu ujednačne ni kod mjerenja antene u slobodnom prostoru za prvi slučaj kada je razmak između antena bio veći, što je opet posljedica fizikalnih utjecaja unutar prostorije gdje je obavljano mjerenje. Zbog manjeg razmaka odašiljačke i prijemne antene u slučaju mjerenja antene u slobodnog prostoru za drugo kućište dobivene su veće amplitude snage, zračenje se manje gubi pri propagaciji na manjem razmaku, gušenje pri propagaciji za više frekvencije je veće, nego gušenje za niže frekvencije. Djelotvornost oklapanja je najveća za frekvencije u opsegu od 975 [MHz] do 1100 [MHz].

5. ZAKLJUČAK

Prema dobivenim rezultatima mjerenja djelotvornosti oklapanja vidljivo je kako kućište u kojemu je smještena prijemna antena stabilizira amplitude zračenja ukupnog polja na mjestu prijema. Snaga ukupnog polja u mjerenim frekvencijama se približno ujednačava za razliku od mjerenja ukupne snage polja na mjestu prijema kada je antena u slobodnom prostoru. Kućište općenito smanjuje amplitude zračenja, na određenim frekvencijama više, a na nekima slabije. Iako su rezultati pokazali da određeni uži opseg frekvencija čak i pojačava, što se događa uslijed refleksija u samom kućištu. Kako bi mjerenje bilo što preciznije, potrebno je izraditi kućište kojemu će stvarne dimenzije biti što više približno zadanim, s tim da se dimenzije kućišta odnosno ukupan volumen gleda za prostor unutar kućišta. Kućišta su tehnički pripremljena za rezanje i savijanje računalnim programom i nadekvanim strojem za realizaciju izrade, dok su rubovi zavareni posebnom legurom bakra i srebra kako bi na rubovima gdje je kućište vareno provodljivost materijala ostala ista. Zbog svojstva materijala bakra, koriste se posebne metode rezanja vodom i pijeskom, jer je bakar jako teško i neprecizno obrađivati standardim alatima. Mjerenje je obavljeno u prostoru koji nije u potpunosti izoliran, iako su postavljeni apsorberi u okolini odašiljačke antene koji prigušuju zračenje u okolnim smjerovima, što je u svakom slučaju ublažilo refleksije od okolnog prostora na mjestu odašiljanja. Zbog fizikalnih utjecaja na širenje elektromagnetskog vala prostor dodatno djeluje na dobivene rezultate, većinom reflektiranjem valova od okolnih zidova, poda, stropa i predmeta koji se nalaze u prostoru. Unatoč ne savršenim uvjetima rezultati pokazuju jasne vrijednosti djelotvornosti oklapanja, te da je oklapanje uspješno. Da bi se što više smanjio fizikalni utjecaj kod širenja elektromagnetskog vala mjerenje bi trebalo biti rađeno u prostoru u kojemu su zidovi, pod, strop obloženi odgovarajućim apsorpcijskim materijalima, te da u prostoru za vrijeme mjerenja osim odašiljačke i oklopljene prijemene antene ne bi trebalo biti ništa, čak ni osobe koje obavljaju mjerenje, što je poprilično skupo s obzirom na cijenu takvih specijaliziranih apsorbera izađenih od odgovarajućih materijala, računajući kvadraturu prostora u kojem bi se mjerenje obavljalo. Oklapanje se primjenjuje za smanjivanje zračenja unutar kućišta, a otvorima raznih oblika selektivno biramo koju frekvenciju treba manje ugušiti. Tako da rezultati mjerenja prvog kućišta imaju veću razliku amplitude snage zračenja na određenim frekvencijama, dok su amplitude zračenja kod drugog kućišta približno sličnih vrijednosti.

6. LITERATURA

[1] H. Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering, John Wiley & Sons, New York, 2009. str. (238, 243, 238).

[2] C. R. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility, 2nd Ed., Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, 2006. str.(713, 718, 721).

[3] Griffiths, David J. (1999). Introduction to electrodynamics, Third Edition, ed. Prentice Hall, pp. Str. (499, 500).

[4] Lekner, John (1987). Theory of Reflection, of Electromagnetic and Particle Waves. Springer.

[5] P.Hanrahan and W.Krueger (1993), Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering, in SIGGRAPH ’93 Proceedings, J. T. Kajiya, Ed., vol. 27.

[6] R. L. Pfleegor and L. Mandel, 1967, "Interference of independent photon beams", Phys. Rev., Volume 159, Issue 5.

[7] John M. Cowley (1975) Diffraction physics (North-Holland, Amsterdam) ISBN 0-444-10791-6

[8] West, William. "Absorption of electromagnetic radiation". AccessScience. McGraw-Hill. 2013.

[9] J. D. Krauss, Electromagnetics, 4Ed, McGraw-Hill, 1992, ISBN 0-07-035621-1

[10] Signalni generator: http://www.naic.edu/~phil/hardware/synth/hp8648/agilent8648OperationAndServiceGuide.pdf

[11] Spektralni analizator: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/h/hms_x_1/HMS-X_SCPI_ProgrammersManual_en_02.pdf

[12] Dipol odašiljška antena: Seibersdorf laboratories, RF engineering, "User manual", "PCD - Precision conical dipole antenna".

[13] Weiner, Melvin M. Weiner (2003). Monopole antennas. USA: CRC Press. pp. vi. ISBN 0-8247-4844-1.

7. SAŽETAK

Ovim radom opisuje se mjerenje djelotvornosti oklapanjem, u prvom poglavlju opisana je teorija oklapanja i fizikalni utjecaj kod propagacije elektromagnetskih valova. Kućišta koja se koriste za mjerenje djelotvornosti oklapanja napravljena su od bakra, a dimenzije su zadane u radu. Mjerenja se obavljaju pomoću signalnog generatora spojenog na odašiljačku antenu, a rezultati se uzimaju prema vrijednostima na spektralnom analizatoru koji je spojen na prijemnu monopol antenu. Mjerenja se vrše kada je antena oklopnjena kućištem, i kada se nalazi u slobodnom prostoru. Djelotvornost oklapanja se izražava kao razlika amplitude zračenja kada je antena oklopnjena i kada je u slobodnom prostoru. Oklapanjem se frekvencijski selektivno smanjuje amplituda unutar kućišta.

Ključne riječi: refleksija, apsorpcija, elektromagnetsko polje, Faradayev kavez, djelotvornost oklapanja, dipol antena, monopol antena.

ABSTRACT

This paper describes the measurement of the effectiveness of shielding, the first chapter describes the theory shielding and physical effects due to propagation of electromagnetic waves. Enclosures that are used for measuring the effectiveness of shielding are made of copper, and the dimensions are given in third chapter. The measurements were made using a signal generator connected to the transmitter antenna, and the results are taken by the values of the spectral analyzer coupled to receive monopol antenna. Measurements are taken when the antenna is placed inside shielded enclosure, and when it is in free space. The effectiveness of shielding is presented as the difference between the amplitude of the radiation when the antenna is placed inside shielded enclosure and when it's placed in free space. Shielding frequency selective reduces amplitude of radiation inside enclosed space.

Keywords: reflection, absorption, electromagnetic field, Faraday cage, shielding effectiveness, dipole antenna, monopole antenna.

8. ŽIVOTOPIS

Vedran Brijačak, rođen je 29. lipnja 1989. godine u Virovitici. Djetinjstvo provodi u Slatini gdje upisuje Osnovnu školu Josipa Kozarca. Nakon Osnovne škole upisuje Srednju školu Marka Marulića u Slatini, smjer opća gimnazija. 2008. godine završava srednju školu i upisuje sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike i računarstva u Osijeku. 2009./2010. akademske godine opredjeljuje se za smjer komunikacije i informatika, te završava preddiplomski studij akademske 2012./2013. godine.

Upisuje sveučilišni diplomski studij elektrotehnike, smjer komunikacije i informatika, 2013./2014. akademske godine, te isti završava 2016. godine.

2014. godine upisuje Pedagoško-psihološko-didaktičko-metodičku izobrazbu te istu završava 2015. godine.

Tečno razumije, govori i piše engleski jezik, dok njemački poznaje osnove razumijevanja, pisma, te komunikacije.

9. PRILOZI

f [MHz]	Kut antene 0° [dBm]	Kut antene 120° [dBm]	Kut antene 240° [dBm]
500	-93,72	-95,87	-93,21
550	-94,26	-92,88	-97
575	-90,59	-89,09	-92,47
600	-84,94	-84,06	-86,81
625	-79,63	-82	-81,95
650	-75,9	-77,07	-74,6
675	-64,05	-67,33	-65,09
700	-67,56	-70,6	-72,95
725	-83,46	-76,3	-75,82
750	-83,07	-77,68	-79,07
775	-78,95	-78,7	-77,98
800	-78,46	-78,87	-77,28
825	-78,26	-78,59	-79,86
850	-79,23	-79,51	-78,59
875	-77,17	-80,27	-78,7
975	-79,13	-81,49	-83,95
1000	-77,88	-76,38	-77,69
1050	-77,57	-79,23	-77,44
1100	-69,74	-68,53	-68,76
1150	-71,96	-72,91	-74,48
1200	-68,47	-65,65	-67,22
1225	-61,65	-65,72	-66,26
1250	-61,06	-65,44	-69,63
1275	-62,96	-58,9	-61,8
1300	-60,02	-53,14	-57,97
1325	-54,32	-50,37	-53,5
1350	-55,78	-53,46	-52,46
1375	-57,25	-53,23	-52
1400	-58,17	-52,79	-51,32
1425	-61,44	-61,83	-60,87
1450	-53,36	-52,36	-51,25
1475	-56,86	-59,01	-57,15
1500	-58,07	-59,72	-59,53

(300x300x120) 2m

P. 4.1.

Kut antene 0° [W]	Kut antene 120° [W]	Kut antene 240° [W]
8,50730720162357E-008	6,86149580242842E-008	8,95243412846155E-008
8,06009598269213E-008	9,2527931209937E-008	6,12834950532221E-008
1,16339257692864E-007	1,3516693336116E-007	9,64004199528402E-008
2,04692848991212E-007	2,23522159762515E-007	1,69781201478644E-007
3,48107227726464E-007	2,74653569972143E-007	0,000000276
5,054810539642E-007	4,49668461031188E-007	5,75656171487277E-007
1,65327022170143E-006	0,000001191	0,00000149
1,16387537681109E-006	8,58778093974337E-007	6,78924927395838E-007
2,37343998198589E-007	4,85660858340389E-007	5,09541121010432E-007
2,4678328379841E-007	4,23058538332454E-007	3,68157397735482E-007
3,72601900189128E-007	0,000000382	4,10555268954291E-007
3,91314098303027E-007	3,75594670510501E-007	4,40323884810502E-007
3,99219167460109E-007	3,86259938244687E-007	3,40192133987394E-007
3,62313753191947E-007	3,52309678735947E-007	3,86259938244687E-007
4,45194185086172E-007	3,26526319980206E-007	0,000000382
0,000000366	0,000000289	0,000000226
4,14681418004567E-007	4,81791071260827E-007	4,22635691252899E-007
4,27737871402819E-007	3,62313753191947E-007	4,33334764714892E-007
9,3590180142305E-007	1,05628208861553E-006	1,03226485748564E-006
7,49578132268205E-007	6,81646065753954E-007	5,82605659077011E-007
1,06263883230808E-006	1,40882395090566E-006	1,20412754899864E-006
2,10171836458962E-006	0,000001399	1,32545431376511E-006
2,22945080416557E-006	1,43872208553997E-006	9,46253551484103E-007
1,84366470618209E-006	0,000002767	2,07042785464026E-006
2,47379962651403E-006	4,92219849356163E-006	3,03665104724252E-006
4,37433837141383E-006	6,49319872426544E-006	4,74815099941148E-006
3,78011819999343E-006	4,76718163931475E-006	5,26855050895485E-006
3,26335327597615E-006	4,87809745945464E-006	5,51656442076077E-006
2,97652132780268E-006	5,09752577055624E-006	5,90473917797064E-006
2,14632114025049E-006	2,06422587869174E-006	2,27221534610087E-006
4,81509261131044E-006	5,32150032186123E-006	5,94621735647209E-006
3,39313841408305E-006	2,73670674321555E-006	3,29615052165438E-006
3,00643586447669E-006	2,5491380412339E-006	0,000002598

P. 4.2.

P(ukupno) [W]	P(ukupno) [dBm]	f [MHz]
1,41280033017402E-007	-38,4991921227	500
1,37162675480431E-007	-38,6276405217	550
2,02726327155283E-007	-36,9308984778	575
3,47400309021984E-007	-34,5916979957	600
5,22308279812194E-007	-32,8207308952	625
8,8830898258112E-007	-30,5143594628	650
2,52421929653944E-006	-25,978729176	675
1,59782501059308E-006	-27,9647078516	700
7,42853146190674E-007	-31,2909703295	725
6,1271558289771E-007	-32,1274107433	750
6,73303838391164E-007	-31,7178890969	775
6,98629518114727E-007	-31,5575306874	800
6,51385731795861E-007	-31,8616175862	825
6,36073977911258E-007	-31,9649237125	850
6,71392250458666E-007	-31,730236759	875
5,18200371787404E-007	-32,8550227976	975
7,63350667980156E-007	-31,1727591004	1000
7,08526612552246E-007	-31,4964383283	1050
1,74848928181923E-006	-27,5733702556	1100
1,16873354077013E-006	-29,3228449223	1150
2,13633081867767E-006	-26,7033149434	1200
2,85153305469437E-006	-25,4492158975	1225
0,000002817	-25,50205521	1250
3,91687772228871E-006	-24,0705998611	1275
6,2903872841726E-006	-22,0132261525	1300
9,15649516865694E-006	-20,3827072941	1325
8,04816369450508E-006	-20,9430319893	1350
8,05467519122687E-006	-20,9395196803	1375
8,34927499584309E-006	-20,7835123457	1400
3,74575566400201E-006	-24,2646055511	1425
9,31992400084225E-006	-20,3058762908	1450
5,46512217218333E-006	-22,62400125	1475
4,72086281544072E-006	-23,2597861964	1500

P. 4.3.

Kut antene 0° [dBm]	Kut antene 120° [dBm]	Kut antene 240° [dBm]
-56,72	-60	-56,64
-58,86	-58,51	-51,81
-57,49	-56,52	-58,28
-58	-52,57	-58,5
-66,56	-55,73	-54,01
-53,6	-48,8	-56,11
-54,6	-46,54	-55,24
-57,1	-48,9	-54,85
-58,34	-50,73	-68,31
-59,55	-51,82	-60,13
-56,31	-53,44	-56,74
-57,33	-54,27	-56,68
-62,56	-57,22	-61,3
-51,63	-55,4	-53,72
-53,85	-56,32	-55,67
-51,75	-48,44	-57,12
-52,8	-47,1	-53,62
-53,53	-51,86	-52,76
-54,34	-58,55	-51,75
-57,52	-55,93	-49,93
-65,67	-55,76	-56,4
-58,66	-51,32	-57,41
-51,08	-49,39	-62,49
-51,45	-47,47	-61,74
-52,62	-48,98	-67,27
-65,8	-49,31	-65,22
-60,46	-52,61	-62,26
-68,56	-52,77	-55,25
-61,36	-59,73	-54,58
-56,79	-52,41	-54,31
-54,96	-51,45	-62,62
-52,87	-52,66	-53,6
-59,83	-54,76	-54,65

Slobodni prostor 2m

P. 4.4.

Kut antene 0° [W]	Kut antene 120° [W]	Kut antene 240° [W]
0,000003441	2,47875217666636E-006	3,46861465364427E-006
2,77806676906004E-006	0,000002877	5,6223812210551E-006
0,000003186	3,51048877170818E-006	0,000002944
3,02755474537582E-006	5,210914035129E-006	2,87989915808824E-006
1,28628121871595E-006	3,7990661213219E-006	4,51206661920795E-006
4,70090610758328E-006	0,000007597	3,65741011829793E-006
4,25355574481513E-006	9,52343191374827E-006	3,98985655441924E-006
3,31267254489989E-006	7,52142247499327E-006	4,14853507928325E-006
2,92634814561032E-006	6,26360112301965E-006	1,07977779973468E-006
2,59284383460238E-006	5,61676165008783E-006	2,44673694823437E-006
0,000003585	4,77672554331608E-006	3,43410136118044E-006
3,23735059915641E-006	4,39626483374662E-006	3,45476790698534E-006
1,91890609019257E-006	3,27315803558993E-006	2,17658096071513E-006
5,72450039842754E-006	3,92652683830562E-006	4,64483234972292E-006
4,5848403222405E-006	3,58140534904556E-006	3,82192903821179E-006
5,65621691395311E-006	7,87548900756185E-006	3,30605382074049E-006
5,0924307926992E-006	9,00477758243656E-006	4,69151369091559E-006
4,73392789174208E-006	5,59433947772842E-006	5,11284130968996E-006
4,36559843751821E-006	2,8655356011143E-006	5,65621691395311E-006
3,17642159623665E-006	3,72383957192437E-006	6,78527809364153E-006
0,000001406	3,7876860016725E-006	3,55286840622136E-006
2,83418744047885E-006	5,90473917797064E-006	3,21155511388004E-006
6,04816716966475E-006	7,16175654917881E-006	1,93238555591283E-006
5,82847436400755E-006	8,67768926032026E-006	2,08288776411682E-006
5,18492449295365E-006	7,46149114016608E-006	1,19812193779334E-006
1,38784929483593E-006	7,21928039014261E-006	1,47072470952358E-006
2,36731234258794E-006	5,19011201077322E-006	1,97734548086995E-006
1,05311799086937E-006	5,10773102394899E-006	3,98586869212829E-006
2,16356057516861E-006	2,54659017733693E-006	4,26207136909049E-006
0,000003417	0,000005295	4,37871489768367E-006
4,10315126202529E-006	5,82847436400755E-006	1,90742712498391E-006
5,05690825109617E-006	5,16422621912718E-006	4,70090610758328E-006
2,5212511816997E-006	0,000004186	4,23234104703278E-006

P. 4.5.

P(ukupno) [W]	P(ukupno) [dBm]	EFIKASNOST OKLAPANJA [dB]
5,47866943761316E-006	-22,6132490248	15,8859430979
6,89971547726789E-006	-21,6116881784	17,0159523433
5,58039426505377E-006	-22,5333511628	14,397547315
6,67933619295431E-006	-21,7526669652	12,8390310306
6,03706617024925E-006	-22,1917406396	10,6289902556
9,6534858543923E-006	-20,1531583547	10,3612011081
1,11672488650917E-005	-19,5205380539	6,4581911221
9,20629886225247E-006	-20,359149308	7,6055585436
6,99729466253994E-006	-21,5506983716	9,7402719578
6,65262145912332E-006	-21,7700718765	10,3573388668
6,88928892903972E-006	-21,6182560104	10,0996330864
6,46088265498078E-006	-21,8970814671	9,6604492203
4,37415920920497E-006	-23,591054137	8,2705634492
8,35236405938846E-006	-20,7819058408	11,1830178717
6,96091708237794E-006	-21,5733353947	10,1569013643
1,02443208047947E-005	-19,8951682989	12,9598544987
1,13591008182704E-005	-19,4465604584	11,726198642
8,93576262746255E-006	-20,4886837648	11,0077545635
7,6982162723974E-006	-21,1360989207	6,4372713348
8,36639911326971E-006	-20,7746142154	8,5482307068
5,38017665149278E-006	-22,6920346457	4,0112802977
7,29470009370629E-006	-21,3699255851	4,0792903124
9,57106038632171E-006	-20,1903994368	5,3116557732
1,06588848266823E-005	-19,7228823048	4,3477175563
9,1647579460796E-006	-20,3787900087	1,6344361439
7,49714386869276E-006	-21,2510415505	-0,8683342564
6,03749331779824E-006	-22,1914333691	-1,2484013798
6,56392587912084E-006	-21,8283633171	-0,8888436368
5,4158441861776E-006	-22,6633383879	-1,8798260422
7,67368534106125E-006	-21,1499601299	3,1146454212
7,37870191348568E-006	-21,3202003403	-1,0143240495
8,62206887786446E-006	-20,6438851208	1,9801161292
6,46470050526363E-006	-21,8945159018	1,3652702946

P. 4.6.

f [MHz]	Kut antene 0° [dBm]	Kut antene 120° [dBm]	Kut antene 240° [dBm]
500	-81,47	-82,9	-81,56
550	-84,62	-82,86	-83,56
575	-85,34	-82,56	-84,19
600	-84,66	-83,66	-88,07
625	-82,66	-82,42	-86,73
650	-82,88	-79,35	-87,25
675	-81,33	-80,04	-83,76
700	-83,72	-82,52	-82,91
725	-87,31	-84,53	-83,57
750	-86,57	-84,54	-82,1
775	-84,55	-85,29	-78,87
800	-81,47	-85,42	-77,51
825	-76,56	-87,81	-75,31
850	-76,51	-84,4	-74,48
875	-80,87	-82,18	-78,81
975	-86,26	-85,13	-88,19
1000	-86,6	-83,9	-86,58
1050	-87,66	-87,19	-85,36
1100	-84,73	-82,09	-83,94
1150	-80,64	-82,57	-77,75
1200	-77,28	-71,74	-72,27
1225	-67,57	-69,38	-70,27
1250	-70,65	-67,82	-69,85
1275	-74,92	-70,9	-71,26
1300	-76,75	-72,46	-72,77
1325	-76,75	-73,67	-72,74
1350	-76,88	-76,54	-74,93
1375	-79,63	-77,79	-77,45
1400	-76,61	-79,42	-76,83
1425	-77,67	-78,26	-76,61
1450	-77,79	-74,93	-78,3
1475	-81,76	-75,44	-80,66
1500	-78,49	-77,14	-78,63
1525	-81,41	-77,7	-79,72
1550	-80,44	-75,54	-78,76
1575	-79,55	-78,33	-76,61

(200x100x100) 1.5 m

P. 4.7.

Kut antene 0° [W]	Kut antene 120° [W]	Kut antene 240° [W]
2,8960286631649E-007	0,000000251	0,000000287
2,11348949794204E-007	0,000000252	0,000000235
1,96666727580758E-007	2,59695699220672E-007	2,20635177727049E-007
2,10505242534489E-007	2,32644272151578E-007	1,49681627928299E-007
2,571116838388E-007	2,63357008372637E-007	1,71144898605939E-007
2,5151699403288E-007	0,000000358	1,62472792659517E-007
2,93685820435723E-007	3,34123457517232E-007	2,30329422966366E-007
2,31252585752921E-007	2,60736562356008E-007	2,50763573746277E-007
1,6150087457357E-007	2,13259675711597E-007	2,34747521023957E-007
1,73905240834412E-007	0,000000213	2,71920721289535E-007
2,12833582595321E-007	1,97652523655107E-007	3,75594670510501E-007
2,8960286631649E-007	1,95099670346678E-007	4,3031201333461E-007
4,73196415930545E-007	1,53624383976979E-007	5,36201786708464E-007
4,75568322835991E-007	2,16050150281479E-007	5,82605659077011E-007
3,0751090743914E-007	2,69754033824732E-007	3,77855012779348E-007
1,7938073497059E-007	2,0084039902886E-007	1,47896182491077E-007
1,73384306903506E-007	2,27127278358615E-007	1,73731422517221E-007
1,55946119218574E-007	1,63450559783547E-007	1,9627378719696E-007
0,000000209	2,72192778016517E-007	2,26220583843138E-007
3,14665622128273E-007	2,59436133326029E-007	4,20107469355734E-007
4,40323884810502E-007	7,66251586686133E-007	7,26697689345976E-007
1,16271208317803E-006	9,70208074186592E-007	8,87590562115797E-007
8,54494920361771E-007	0,000001134	9,25663296621851E-007
5,57526791099938E-007	8,33397365606696E-007	8,03928679346905E-007
4,64290557598314E-007	0,000000713	6,91256224822571E-007
4,64290557598314E-007	6,31760620878207E-007	6,93333107263038E-007
4,58293843445019E-007	4,74143755786482E-007	0,000000557
3,48107227726464E-007	4,18430395861397E-007	4,32901646545355E-007
4,70836338960144E-007	3,55494777288672E-007	4,60591050895022E-007
4,23481808470583E-007	3,99219167460109E-007	4,70836338960144E-007
4,18430395861397E-007	0,000000557	3,97625480289526E-007
2,8132499249656E-007	5,29276276829457E-007	0,000000314
3,90141915161967E-007	4,4653177302014E-007	3,84717984455225E-007
2,91345706807343E-007	4,2221326680907E-007	0,000000345
0,000000321	0,000000524	3,79749018912734E-007
3,50903254744219E-007	3,96434391375345E-007	4,70836338960144E-007

P. 4.8.

P(ukupno) [W]	P(ukupno) [dBm]	f [MHz]
4,78802412123869E-007	-33,1984367036	500
4,04226976501937E-007	-33,9337470677	550
3,93445726348227E-007	-34,0511516768	575
3,47621064147021E-007	-34,5889391529	600
4,05898889065055E-007	-33,9158213733	625
4,66708107637532E-007	-33,309546545	650
5,00940604335776E-007	-33,0021376463	675
4,29352632791095E-007	-33,6718586966	700
3,55905353148189E-007	-34,4866547975	725
3,86746340979603E-007	-34,1257378648	750
4,74801022011836E-007	-33,234883549	775
5,54167962235453E-007	-32,5635858542	800
7,31455846562982E-007	-31,358118844	825
7,82478275168228E-007	-31,0652771142	850
5,56870368794425E-007	-32,5424589041	875
3,07225641436543E-007	-35,1254254037	975
3,3441220914443E-007	-34,7571787517	1000
2,9926355797779E-007	-35,2394616499	1050
0,000000411	-33,861066794	1100
5,85501363647441E-007	-32,3247208911	1150
1,14416613712101E-006	-29,4151090981	1200
1,75528348181771E-006	-27,556527341	1225
0,000001695	-27,7083365445	1250
1,28518038160829E-006	-28,9103591261	1275
1,09626617039313E-006	-29,6008398755	1300
1,04661263206326E-006	-29,8021402786	1325
8,63168940531069E-007	-30,6390419529	1350
6,95461338794479E-007	-31,5772700775	1375
7,48470113584701E-007	-31,2582553636	1400
7,48598453016335E-007	-31,2575107469	1425
8,02125358384094E-007	-30,9575775366	1450
6,7668036443549E-007	-31,6961642547	1475
7,06830436417426E-007	-31,5068475786	1500
6,18193581062308E-007	-32,0887550869	1525
7,22392547250352E-007	-31,4122674318	1550
7,08505595560556E-007	-31,4965671548	1575

P. 4.9.

Kut antene 0° [dBm]	Kut antene 120° [dBm]	Kut antene 240° [dBm]
-62,09	-54,09	-56,44
-59,51	-46,75	-47,6
-56,9	-47,2	-55,12
-51,65	-49,52	-65,5
-52,88	-49,16	-53,47
-50,77	-50,6	-53,48
-49,86	-51,43	-48,27
-57,8	-49,8	-52,25
-61,84	-49,59	-47,28
-54,59	-52,11	-50,84
-56,2	-48,94	-50,07
-49,9	-46,64	-47,99
-48,64	-46,8	-45,83
-50,21	-46,13	-52,73
-54,97	-51,26	-57,08
-50,69	-50,3	-50,4
-48,3	-49,91	-45,81
-52,7	-49,22	-48,1
-51,81	-45,19	-51,21
-53,87	-47,37	-56,66
-52,84	-47,05	-52,93
-48,81	-46,72	-55,15
-51,08	-46,93	-55,59
-55,29	-45,8	-48,21
-50,12	-47,66	-48,82
-58,68	-49,7	-49,24
-59,26	-47,87	-48,96
-50,85	-47,3	-51,79
-51,5	-47,62	-52,41
-53,12	-48,15	-61,97
-50,84	-45,57	-59,11
-54,09	-48,66	-65,24
-56,92	-50,4	-55,52
-59,55	-47,99	-53,98
-58,67	-51,48	-55,46
-61,36	-54,07	-59,92

Slobodni prostor

P. 4.10.

Kut antene 0° [W]	Kut antene 120° [W]	Kut antene 240° [W]
2,01124770648782E-006	4,47611408812524E-006	3,53868531768433E-006
2,60323598037615E-006	9,32552513772833E-006	8,56560939749806E-006
3,37959296937672E-006	8,91517854843955E-006	0,000004038
5,71306283900263E-006	7,06925626857205E-006	1,43011559830787E-006
5,05185387045659E-006	7,32838584115783E-006	4,76241684047192E-006
6,23859676059157E-006	6,34555951290911E-006	4,75765680404633E-006
6,83294166818181E-006	5,84014297745948E-006	8,01051680506538E-006
3,08871540823677E-006	6,87406255749626E-006	5,38035995991082E-006
2,06216268458204E-006	7,01994426805104E-006	8,84414164652278E-006
4,25781142804691E-006	5,45621474387993E-006	6,19507907287152E-006
3,62464110896576E-006	7,49139687632475E-006	6,69094606528051E-006
6,80566449223054E-006	9,428672182928E-006	0,000008238
7,71954387685406E-006	0,000009279	1,02241777084357E-005
6,59792548376837E-006	0,000009922	5,12820286442997E-006
4,09905016165521E-006	5,94027411123352E-006	3,31930451975389E-006
6,28870570319932E-006	6,53881057054907E-006	6,47374831828941E-006
7,9865212659555E-006	6,79886222943657E-006	1,0244646525847E-005
5,14361057303038E-006	7,28454717362939E-006	8,14785969767998E-006
5,6223812210551E-006	1,08999181385501E-005	0,00000597
4,5756798051666E-006	8,76490148729097E-006	3,46168435694379E-006
5,07210175470975E-006	9,04991421790279E-006	5,02665764416216E-006
7,58942081079115E-006	9,35354372000099E-006	4,02592733845974E-006
6,04816716966475E-006	9,15916739655454E-006	3,85262709903797E-006
0,00000397	1,0254896296404E-005	8,05872438400996E-006
6,65757483255929E-006	8,51436961418228E-006	7,58183518342618E-006
2,82852473019575E-006	6,94314803474611E-006	0,00000727
2,6691372129729E-006	8,33743219756124E-006	7,47642905538232E-006
6,18888709030594E-006	8,82647103972673E-006	5,63363723575991E-006
5,79940472684214E-006	8,54849529850676E-006	0,000005295
4,93205274151196E-006	8,10722207790271E-006	2,03552806978178E-006
6,19507907287152E-006	1,04934922466369E-005	2,70947605614078E-006
4,47611408812524E-006	7,70412021790052E-006	1,46778619959397E-006
3,37284053812003E-006	6,47374831828941E-006	3,87969009872298E-006
2,59284383460238E-006	0,000008238	4,5256231436849E-006
2,83135466965985E-006	0,000005811	0,000003903
2,16356057516861E-006	4,48507527450081E-006	2,49866172609325E-006

P. 4.11.

P(ukupno) [W]	P(ukupno) [dBm]	EFIKASNOST OKLAPANJA [dB]
0,00000605	-22,1824160898	11,0160206138
1,29271776120867E-005	-18,8849628419	15,0487842257
1,03541145927301E-005	-19,8488703283	14,2022813485
0,000009201	-20,3616419771	14,2272971758
1,00949037007661E-005	-19,9589781961	13,9568431773
1,00906646628566E-005	-19,9608022624	13,3487442826
1,20401304528722E-005	-19,1936880754	13,8084495709
9,25965292090707E-006	-20,3340529165	13,3378057801
1,14782827081399E-005	-19,4012308286	15,0854239689
9,28860819537945E-006	-20,320493558	13,8052443069
1,06783804753298E-005	-19,714946091	13,5199374579
1,425065815412E-005	-18,4616507768	14,1019350774
1,58185102394849E-005	-18,0083442003	13,3497746437
1,29721748350485E-005	-18,8698720667	12,1954050475
0,000007944	-20,9996174436	11,5428414605
1,11451011833689E-005	-19,5291598432	15,5962655604
1,46615767223709E-005	-18,3381932267	16,418985525
1,2079278741088E-005	-19,1795899685	16,0598716814
1,36404135326765E-005	-18,6517246309	15,2093421631
1,04758580721788E-005	-19,7981039407	12,5266169504
0,000011528	-19,3824657691	10,032643329
1,27002432771895E-005	-18,9618795992	8,5946477418
1,16324291992068E-005	-19,3432958212	8,3650407233
1,36332863176953E-005	-18,6539944441	10,256364682
1,32023489321664E-005	-18,7934879322	10,8073519433
1,04432107011217E-005	-19,8116595963	9,9904806823
1,15123438330677E-005	-19,3883624803	11,2506794726
1,21633376560807E-005	-19,1494723701	12,4277977074
0,000011608	-19,3524131734	11,9058421902
9,70544015428245E-006	-20,1298476401	11,1276631068
1,24833346806116E-005	-19,0366938581	11,9208836785
9,03014185876918E-006	-20,443054271	11,2531099837
8,26664779982006E-006	-20,8267056508	10,6801419278
9,7503042773521E-006	-20,1098183108	11,9789367761
0,000007551	-21,2199334922	10,1923339396
5,57137370868314E-006	-22,5403770958	8,956190059

P. 4.12.